

Trabajo de Fin de Grado

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

**Desarrollo de una herramienta para el diseño de un  
sistema de aspersión de la contención**

**MEMORIA**

**Autor:** Antonio Bosch Durán  
**Director:** Francesc-Josep Reventós Puigjaner  
**Convocatoria:** Septiembre 2016



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## Resumen

Uno de los sistemas de seguridad activos de una central nuclear es el sistema de aspersión de la contención. Este sistema está formado por una serie de elementos, entre los que destacan las bombas y los aspersores, y cuya finalidad es disminuir una posible sobrepresión generada dentro de la estructura de la contención en el escenario de un accidente.

Se pretende confeccionar una herramienta que a partir de la introducción de unos parámetros por parte del usuario sea capaz de realizar los cálculos necesarios para obtener el dimensionamiento de dicho sistema.

La parte más importante a dimensionar son las bombas, ya que son las encargadas de impulsar el refrigerante recogido de un sumidero hasta los aspersores, venciendo unas pérdidas de carga generadas tanto por fricción como por la elevación del refrigerante a una cota superior.

La herramienta consiste en una hoja de cálculo que obtiene como resultados las pérdidas de carga del sistema, pudiendo comprobar que bomba es la adecuada para cada caso. También puede servir para comprobar si la introducción de algún elemento o ampliación del sistema implica el cambio de las bombas o si por el contrario se pueden mantener las existentes.

Esta herramienta pretende ser una ayuda de trabajo para el responsable del sistema, de forma que no se tengan que repetir los cálculos cada vez que se realice una modificación. En concreto, la herramienta se basa en unos cálculos realizados en una central nuclear PWR del tipo Westinghouse y por tanto su uso se debe adaptar a las características del caso de estudio.

Únicamente se ha estudiado la fase de recirculación, pero el trabajo podría continuarse añadiendo la fase de inyección desde un tanque o la introducción de un sistema auxiliar flexible de bombeo.



# Sumario

|   |           |
|---|-----------|
| <b>RESUMEN</b>  | <b>1</b>  |
| <b>SUMARIO</b>  | <b>3</b>  |
| <b>1. GLOSARIO</b>                                      | <b>5</b>  |
| 1.1. Acrónimos:   | 5         |
| <b>2. PREFACIO</b>                                      | <b>7</b>  |
| 2.1. Origen del proyecto                                | 7         |
| 2.2. Motivación   | 7         |
| <b>3. INTRODUCCIÓN</b>                                  | <b>9</b>  |
| 3.1. Objetivos del proyecto                             | 9         |
| 3.2. Alcance del proyecto                               | 10        |
| <b>4. INTRODUCCIÓN DEL SISTEMA</b>                      | <b>13</b> |
| 4.1. Escenario del proyecto                             | 13        |
| 4.2. Descripción del sistema                            | 16        |
| <b>5. CONCEPTOS TEÓRICOS</b>                            | <b>19</b> |
| 5.1. Bombas hidráulicas                                 | 19        |
| 5.2. Pérdidas de carga por fricción                     | 21        |
| 5.3. NPSH   | 23        |
| <b>6. OBTENCIÓN DEL MODELO TEÓRICO</b>                  | <b>25</b> |
| 6.1. Datos del problema                                 | 25        |
| 6.2. Pérdidas de carga                                  | 26        |
| 6.2.1. Pérdidas por fricción cuantificables             | 27        |
| 6.2.2. Pérdidas de carga por diferencia de alturas      | 28        |
| 6.2.3. Pérdidas por fricción no cuantificables          | 29        |
| 6.2.4. Pérdidas de carga debidas al Orificio Restrictor | 31        |
| 6.3. NPSH   | 31        |
| 6.4. Curvas y puntos de funcionamiento                  | 32        |
| 6.5. Resultados   | 35        |
| 6.6. Comprobación de resultados                         | 36        |
| 6.6.1. Pérdidas para caudal nominal                     | 36        |
| 6.6.2. Puntos de funcionamiento                         | 42        |
| 6.7. Análisis de los resultados                         | 43        |
| <b>7. DISEÑO DE LA HERRAMIENTA</b>                      | <b>45</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| 7.1. Datos y resultados .....                             | 47        |
| 7.2. Cálculo pérdidas .....                               | 49        |
| 7.3. Curvas Bomba .....                                   | 52        |
| 7.4. Cálculos .....                                       | 53        |
| 7.4.1. Tabla Cálculos .....                               | 54        |
| 7.4.2. Gráficas .....                                     | 60        |
| 7.4.3. Puntos de funcionamiento.....                      | 61        |
| 7.5. Hojas ocultas .....                                  | 63        |
| <b>8. INSTRUCCIONES DE USO .....</b>                      | <b>65</b> |
| 8.1. Introducción de datos.....                           | 65        |
| 8.2. Obtención de curvas y puntos de funcionamiento ..... | 73        |
| <b>9. COSTE DEL PROYECTO DE INGENIERIA.....</b>           | <b>77</b> |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>                                 | <b>79</b> |
| <b>AGRADECIMIENTOS .....</b>                              | <b>81</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>                                  | <b>83</b> |
| Referencias bibliográficas .....                          | 83        |
| Bibliografía complementaria .....                         | 85        |

# 1. Glosario

En todo el documento aparecen una serie de referencias a las hojas de cálculo utilizadas en el proyecto. Estas referencias se encuentran entre comillas (""). En este documento se han escrito correctamente, todo y que en la hoja de Excel todos los nombres de hojas no están acentuados para evitar problemas a la hora de realizar la programación de las mismas.

## 1.1. Acrónimos:

**NPSHd** – *Net Positive Suction Head* disponible → Carga neta positiva de aspiración

**NPSHr** – *Net Positive Suction Head* requerida

**OR** – Orificio Restrictor

**lw** – *loss of weight* → pérdida de carga

**LOCA** – *Lost Of Coolant Accident* → Accidente por pérdida de refrigerante

**m.c.a.** – Metros Columna de Agua

**TDHr** – *Total Dinamic Head* → Altura dinámica total requerida

**gpm** – Galón por minuto

**PWR** – *Pressurized Water Reactor* → Reactor de agua a presión

**SCRAM** – *Safety Control Rod Axe Man*



## **2. Prefacio**

### **2.1. Origen del proyecto**

Este proyecto surge a raíz de la intención de realizar una herramienta que unifique las tareas a desempeñar en el diseño de los diferentes sistemas existentes en una central nuclear. La primera idea consistía en, de alguna forma, conseguir que se pudiese unificar el trabajo realizado por los ingenieros de sistemas y los encargados del “lay out” o emplazamiento de estos. Se pretendía que el estudio se realizase de la forma más real posible, para que así los resultados obtenidos fueran lo más útiles posibles. De esta forma se procedió a intentar acceder a información sobre los diferentes sistemas que se podían encontrar. Esto no fue fácil debido a la estrecha confidencialidad de la mayoría de estos documentos. Finalmente se consiguió el acceso a los cálculos en los que se basa este trabajo. Estos cálculos están referidos a la fase de recirculación de la aspersión del edificio de contención. En ellos se calculan las diferentes pérdidas del sistema para poder determinar cuál es la bomba adecuada para impulsar el refrigerante del sistema. Esto hizo que la idea de unificar sistemas no fuera tan accesible, pero abrió otra puerta: realizar una herramienta lo más versátil posible que permitiese realizar los mismos cálculos modificando las diversas entradas con cierta facilidad.

### **2.2. Motivación**

Una vez se ha visto el coste en tiempo que supondría realizar alguna modificación en el sistema, es de gran utilidad una herramienta que consiga generalizar el proceso así como agilizarlo y realizarlo de forma automática. Así mismo se puede realizar estudios sobre diferentes modificaciones de alguna de las magnitudes físicas que caracterizan el sistema (caudal, velocidad...) fácilmente sin tener que realizar todos los cálculos de nuevo.





## 3. Introducción

### 3.1. Objetivos del proyecto

Este proyecto tiene como objetivo principal el desarrollo de una herramienta de trabajo que sea capaz de automatizar los cálculos relativos al sistema de aspersión de la contención de una central nuclear. El programa debe ser capaz de calcular las curvas de funcionamiento del sistema y el punto de trabajo de la bomba para poder optimizar el uso de la bomba. Esto se llevará a cabo calculando todas las pérdidas de carga existentes en el sistema y realizando una serie de comprobaciones para ver si la bomba trabajará correctamente.

Con esta herramienta se pretende facilitar el trabajo del responsable del sistema. En ella se permite cierta flexibilidad de entrada de datos, dichas posibilidades de entradas de datos serán explicadas con mayor profundidad en el alcance, pudiendo hacer estudios comparando diversas disposiciones de las características. Esta herramienta pretende ser útil a la hora de seleccionar una bomba adecuada al sistema en cuestión, cambiar accesorios tales como válvulas u orificios, retocar parcialmente el recorrido de alguna tubería...

Todos los sistemas en operación en una central nuclear siguen un mantenimiento que incluye tareas tales como la vigilancia de sus condiciones de su funcionamiento o el recambio de algún accesorio o algún componente. El responsable de cada sistema necesita poder dar una respuesta rápida a la viabilidad de las modificaciones generadas por el mantenimiento. La herramienta debe simplificar su tarea al tiempo que minimizar el riesgo de error en algún cálculo.

El proyecto se basa en el diseño de un programa que pueda complementar o incluso sustituir a los diversos softwares de cálculo de pérdidas de carga existentes en el mercado. La mayoría de estos programas están basados en diseños CAD, siendo algunos de ellos públicos y otros de pago (la gran mayoría).

Al desarrollar esta herramienta se busca abrir un camino de forma que al ir mejorándola se le puedan añadir nuevas funciones, estudios, inserción de otros sistemas relacionados, como podría ser incluir estudios sobre la fase de inyección desde un depósito o el acoplamiento de un sistema auxiliar, etc.

### 3.2. Alcance del proyecto

La intención es diseñar una herramienta dentro de las posibilidades que ofrece un Trabajo de Fin de Grado, es decir, que sea adecuado a la carga lectiva de este. La realización de este proyecto debería suponer unas 300 horas de trabajo. Otro factor que afecta a las posibilidades de este proyecto es la poca información real a la que se puede acceder por el hecho de tratarse de un proyecto de carácter académico, ya que existe mucha confidencialidad en este sector. Por tanto se han marcado unos límites dentro de las posibilidades del autor, del software y del problema en cuestión.

Este proyecto incluye/considera los siguientes puntos:

- Este proyecto únicamente considera la fase de recirculación.
- Este proyecto permite la obtención de las curvas del sistema, curvas de NSPH y puntos de funcionamiento de un sistema de aspersion de la contención de una central nuclear.
- Se pueden obtener resultados de las pérdidas de carga por fricción del sistema para cualquier caudal, velocidad, viscosidad del refrigerante, densidad del refrigerante y altura del sistema.
- La herramienta desarrollada permite introducir los datos en el sistema internacional de unidades y en el sistema anglosajón.
- La herramienta desarrollada permite decidir si se quiere dar como dato la velocidad del fluido o el caudal volumétrico.
- Este proyecto tiene en cuenta la posibilidad de tener un fluido en régimen turbulento o régimen laminar, y adecuar los cálculos según sea necesario.
- Se incluye un estudio diferenciado según si el sistema contiene o no un orificio restrictor.

Este proyecto no incluye o no considera los siguientes puntos:

- No se incluyen estudios termodinámicos del sistema por imposibilidad de encontrar documentación. Se considera temperatura constante.
- No se considera la fase de inyección de refrigerante desde un depósito externo.
- Este proyecto no incluye un estudio detallado de los accesorios.
- La herramienta diseñada no puede poseer más de dos líneas en la aspiración y cinco en la descarga sin modificar el programa.
- No se consideran posibles variaciones en la viscosidad o densidad del fluido durante

el ciclo del sistema.

- En este proyecto no se consideran los sistemas presentes en el entorno del sistema de estudio ni las influencias que estos ejercen sobre él.
- No se incluyen resultados en el sistema de unidades anglosajón, únicamente en el sistema internacional.



## 4. Introducción del sistema

### 4.1. Escenario del proyecto

Para ubicar el sistema dentro del conjunto de la central se explicará cómo funciona esta y los sistemas relacionados con este proyecto.

Una central nuclear de fisión es una instalación que genera energía eléctrica a partir de la fisión nuclear de diferentes materiales pesados como pueden ser el uranio o el plutonio. Estas reacciones desprenden calor que es aprovechado para generar vapor mediante un ciclo termodinámico convencional. La energía generada por el movimiento de las turbinas por donde se hace pasar el vapor finalmente acaba generando energía eléctrica mediante alternadores.

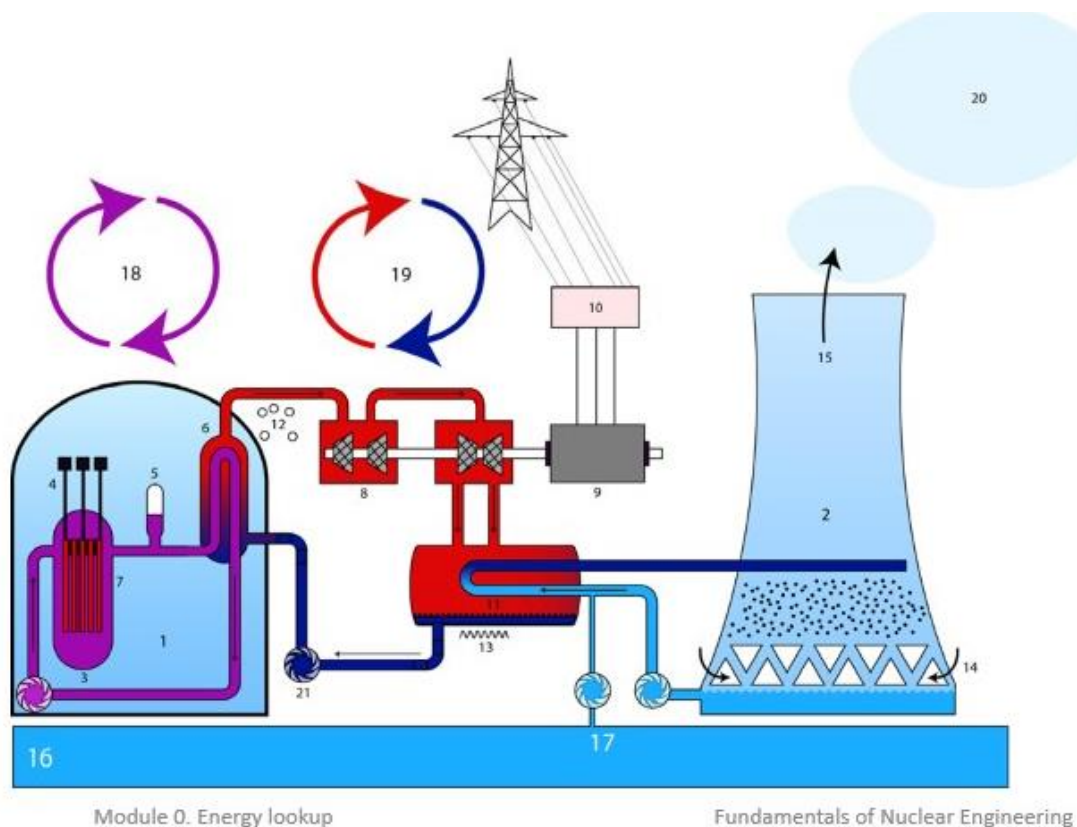


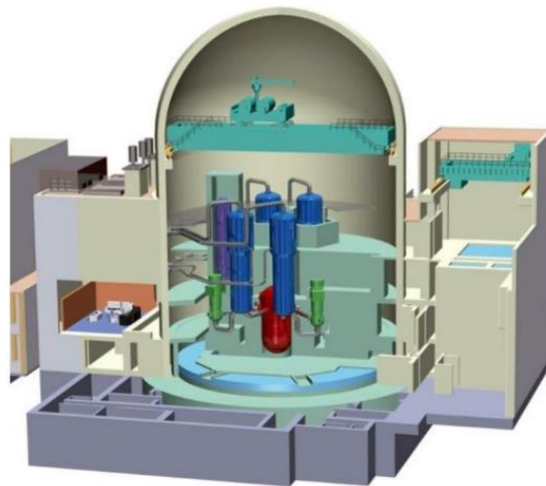
Fig. 4.1.1 Esquema central nuclear tipo PWR. [1]

Las reacciones nucleares aportan una gran cantidad de energía eléctrica y no producen contaminación atmosférica. Los grandes inconvenientes son que se generan residuos radioactivos que tienen que ser tratados muy cuidadosamente, y que debido a la gran actividad radioactiva en el interior del reactor cualquier accidente puede llegar a ser peligroso.

Una central nuclear cuenta con cuatro partes básicas: el reactor, donde se llevan a cabo las reacciones nucleares; la turbina de vapor, donde mediante la expansión del vapor producido se obtienen energía eléctrica; el condensador, donde se convierte el vapor nuevamente en líquido para volver a empezar el proceso y el circuito de refrigeración que mantiene la temperatura deseada en el núcleo.

Nuestro caso de estudio se refiere a la central nuclear de diseño Westinghouse. El reactor de esta central es de tipo PWR y tiene una producción superior a los 1000 MWe. La particularidad de las centrales que poseen el diseño PWR, que significa “reactor de agua a presión”, es que el circuito primario de refrigeración trabaja con agua a presión para que esta no llegue al punto de ebullición. Otras características propias de las PWR son el combustible utilizado (óxido de uranio), el moderador (agua a presión) y el control (agua con ácido bórico disuelto).

El reactor nuclear está ubicado en el interior del edificio de contención, que se trata de una estructura estanca de acero u hormigón (o ambos), cuya función es aislar el reactor del entorno, para que en caso de un accidente no se produzcan escapes al exterior.



*Fig. 4.1.2 Ilustración del edificio de contención con el reactor en el interior. [2]*

A partir de los graves acontecimientos sucedidos en materia de seguridad, y sus devastadoras consecuencias, la seguridad nuclear ha adquirido una gran importancia, y los sistemas de seguridad son unos de los que más atención acaparan a la hora del diseño de la central.

| Accidentes e incidentes nucleares            |   |   |   |
|--|---|---|---|
| Escala internacional de clasificación (INES) |   |   |   |
|  |   | Consecuencias   |   |
|  |   | En el exterior del sitio  | En el interior  |
| Accidente mayor                              | 7 | Emisión radiactiva mayor: efectos considerables para la salud y el medio ambiente       | 12 de marzo de 2011 Fukushima (Japón)<br>1986 Chernobyl (Ucrania)   |
| Accidente grave                              | 6 | Radiación importante  | 1957 Kyshtym (ex URSS)  |
| Accidente                                    | 5 | Radiación limitada  | Graves daños en el núcleo del reactor<br>1979 Three Mile Island (EE.UU.)  |
| Accidente                                    | 4 | Radiación menor   | Daños importantes en el núcleo del reactor<br>Exposición mortal de un trabajador<br>1999 Tokai Mura (Japón)<br>1980 St-Laurent-des-Eaux (Francia) |
| Incidente grave                              | 3 | Muy débil radiación   | Contaminación grave de un trabajador<br>Accidente evitado por escaso margen<br>2008 Toulouse (Francia)<br>2005 Sellafield (G.B.)                  |
| Incidente                                    | 2 |   | Contaminación importante o sobreexposición de un trabajador<br>Fallas importantes de las reglas de seguridad                                      |
| Anomalía                                     | 1 |   | Ruptura del régimen operativo normal  |
| Diferencia                                   | 0 | En relación al funcionamiento normal, pero sin incidencia en el funcionamiento habitual |   |

Fig. 4.1.3 Clasificación de accidentes e incidentes nucleares. [3]

Entre los diversos accidentes que se pueden producir en el interior del edificio de contención encontramos el accidente por pérdida de refrigerante (LOCA) que sucede cuando hay una rotura en las tuberías de la vasija del reactor, dando lugar a un escape del refrigerante que debido a las altas temperaturas se evapora, aumentando notablemente la presión interior así como incrementando también el nivel de radiación, poniendo a prueba la resistencia estructural del edificio de contención.

En caso de rotura de la contención se produciría un escape como sucedió en el caso de Fukushima, que debido entre otras cosas a roturas en los sistemas de refrigeración originadas a partir de una serie de desastres naturales, y al estar afectados los generadores que mantenían el sistema de aspersión de la contención, la presión se descontroló y provocó un fallo estructural de la contención que dio pie a los escapes que contaminaron la zona.

En caso de producirse este accidente los reactores se apagan automáticamente, pero al seguir aumentando la presión, como se ha mencionado anteriormente, es necesario disponer



de un sistema de seguridad que se encargue de reducir esta presión para estabilizar el interior de la contención.

Existe un sistema de seguridad activo llamado rociado de la contención cuya misión es disminuir la presión en el interior del edificio de contención al suceder un LOCA, mediante la aspersión de refrigerante con el objetivo de condensar el vapor para conseguir, de este modo, un descenso de la presión en el interior. También se busca reducir la concentración de yodo radioactivo, que se ve aumentada cuando tiene lugar un accidente de este tipo.

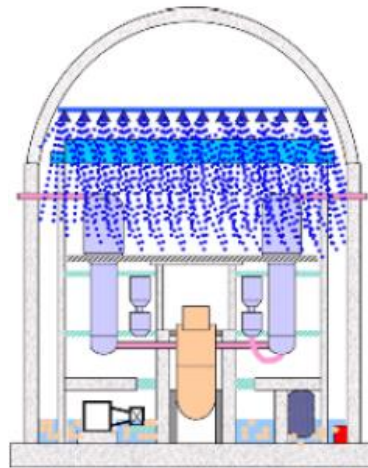


Fig. 4.1.3 Ilustración del sistema de rociado de la contención en funcionamiento [4]

## 4.2. Descripción del sistema

La idea en la que se basa este sistema es en impulsar el refrigerante, que se trata normalmente de agua borada, hasta las toberas de salida o aspersores. Esto se produce mediante una serie de tuberías controladas por válvulas, que conectan los aspersores con la fuente de alimentación del sistema. Para ello se utiliza una bomba, que debe ser capaz de hacer que el fluido circule por todo el circuito de forma segura. Existen varios tipos de sistemas con diferentes características, pero normalmente tienen más de un tren independiente, cada uno con su bomba y accesorios.

Se pueden diferenciar dos formas de trabajo del sistema, según si se abastecen de refrigerante de un depósito o si por el contrario se trabaja con un sistema circuito cerrado con recirculación, donde el refrigerante es recogido del sumidero para después ser impulsado nuevamente por la bomba. Normalmente los circuitos contemplan ambas posibilidades, dando la opción de trabajar en el sistema más apropiado según las condiciones en las que se encuentre este en un instante determinado.

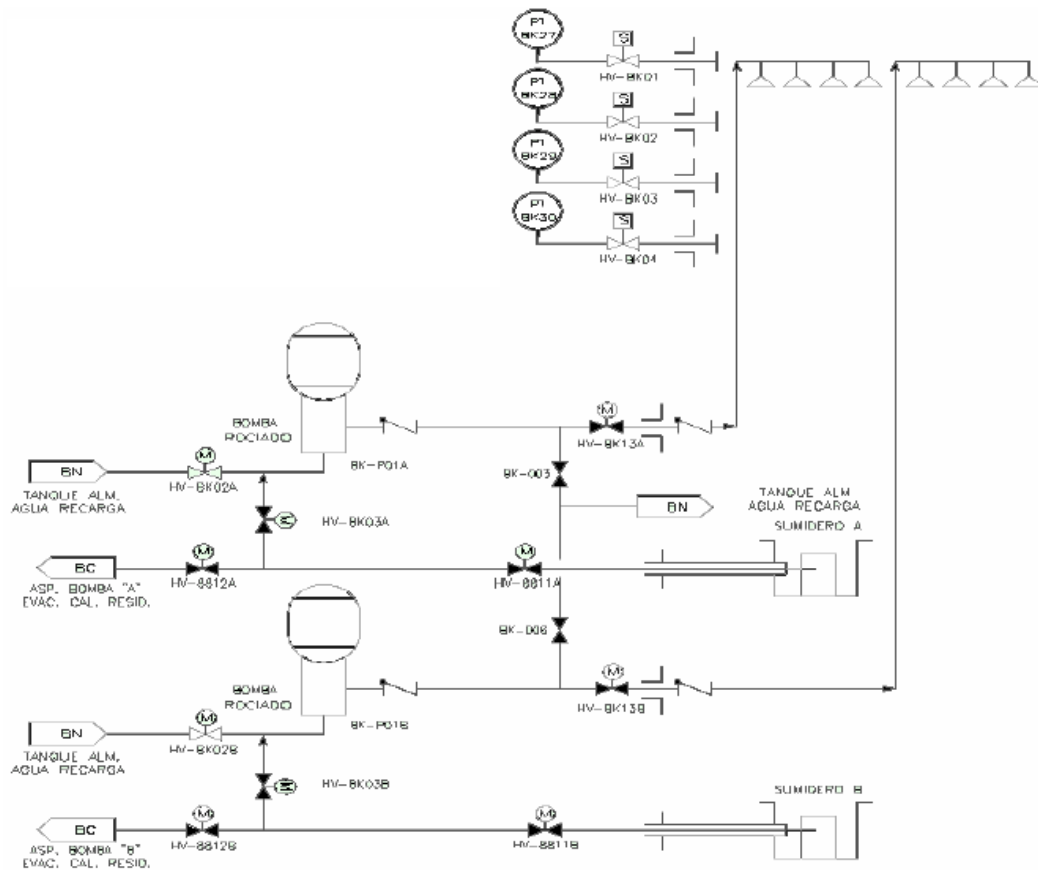


Fig. 4.2.1 Esquema del sistema de aspersión de la contención. [5]

Dentro del sistema se distinguen dos zonas, la aspiración y la impulsión, que hacen referencia a todos los componentes que se hallan antes y después de la bomba respectivamente. En la aspiración que comprende los elementos entre el depósito y la bomba, hay una válvula motorizada normalmente abierta, que permitiría en caso de necesidad interrumpir el flujo, mientras que en la impulsión, comprendida entre la bomba y el punto de descarga, se encuentran una serie de válvulas que permiten controlar el sistema.

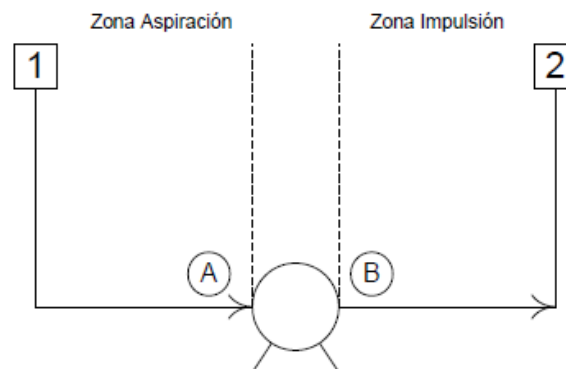


Fig. 4.2.2 Esquema zonas de aspiración e impulsión del sistema. [6]

El refrigerante utilizado (agua borada) llega a los anillos de rociado a través de las válvulas motorizadas que se encuentran fuera de la contención y las válvulas de retención que están situadas en el interior, en el caso de estar utilizando como fuente de abastecimiento un depósito exterior [6]. La distribución de los anillos de rociado así como la orientación y colocación de las toberas ubicadas en ellos se realiza teniendo en cuenta la máxima cobertura del volumen que debe ser rociado.

El elemento en el que se centra este proyecto es la bomba, ya que es el dispositivo que hace posible la impulsión del refrigerante y que según sus características va a dotar al sistema de unas posibilidades de diseño diferentes.

## 5. Conceptos teóricos

### 5.1. Bombas hidráulicas

Una bomba hidráulica es una máquina cuya finalidad es impulsar un fluido. Las características de una bomba se reflejan en la curva de funcionamiento de la misma donde se relacionan el caudal impulsado con la carga de la bomba, es decir, la altura a la que puede impulsar el fluido. En esta curva a medida que aumenta el caudal la carga de impulsión disminuye. Se distinguen una serie de conceptos importantes para el cálculo de bombas:

- El TDH o altura dinámica total, que hace referencia a la diferencia entre las alturas totales de impulsión y de aspiración. Es lo que se ha mencionado anteriormente como carga de la bomba, que representa la energía que tiene que ser transmitida al fluido para poder transportarlo.
- La altura total de aspiración, que representa la presión de entrada a la bomba y es la suma de la altura estática de aspiración y las pérdidas de carga por rozamiento de la zona de aspiración que tienen siempre signo negativo.
- La altura total de impulsión, formada por la altura estática de impulsión y las pérdidas por rozamiento en la zona de impulsión, en positivo.
- La carga neta positiva de aspiración o NPSH.

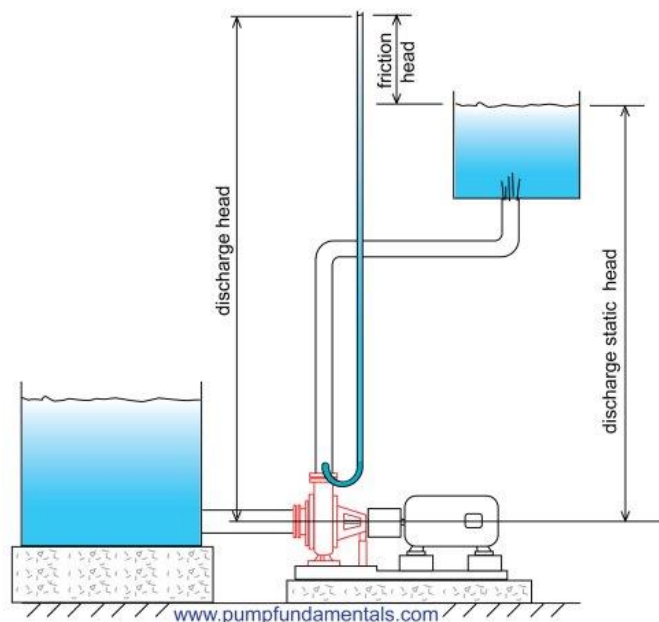


Fig. 5.1.1 Ilustración de un sistema con una bomba hidráulica. [7]

En la Ilustración anterior (figura 5.1.1), se muestran reflejadas tanto la altura total de impulsión como sus componentes. La altura total de impulsión o *discharge head* es la suma de la altura estática o *discharge static head* y las pérdidas por fricción o *friction head*. Para obtener la TDH o altura dinámica total simplemente habría que añadir las pérdidas por fricción de la aspiración, ya que la altura estática de aspiración es nula.

Según el funcionamiento existen dos tipos de bombas:

- Bombas centrífugas o rotodinámicas: Son bombas que impulsan el fluido gracias a la rotación de unos álabes que debido a su geometría conducen el fluido hacia las tuberías de salida. Se utilizan para bombear fluidos de baja viscosidad, y debido a su bajo coste de adquisición y mantenimiento en relación al otro tipo de bombas su uso es el más extendido. Las bombas utilizadas en el caso de estudio pertenecen a este tipo.

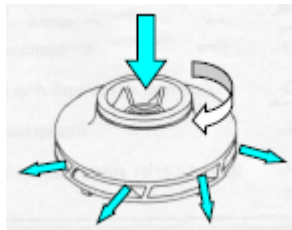


Fig. 5.1.2 Ilustración bomba rotodinámica. [8]

- Bombas de desplazamiento positivo o volumétricas: El funcionamiento de estas bombas se basa en la hidrostática. La impulsión del fluido se realiza gracias al aumento de presión que se produce como consecuencia del empuje de las paredes de las cámaras por donde pasa el líquido, al variar estas su volumen. Se utilizan principalmente para el bombeo de fluidos con una viscosidad elevada.

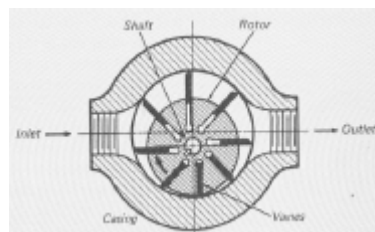


Fig. 5.1.3 Ilustración bomba volumétrica. [8]

## 5.2. Pérdidas de carga por fricción

El rozamiento de un fluido con las paredes de la tubería por donde circula provoca una caída de presión que debe ser cuantificada a la hora de diseñar un sistema, ya que la bomba tiene que ser capaz de vencer estas pérdidas, además de elevar el fluido a la altura deseada. Existen dos tipos de pérdidas, las pérdidas lineales que se producen simplemente por la fricción entre el fluido y la tubería y las pérdidas singulares que se deben al paso del fluido por accesorios del sistema como codos, estrechamientos o válvulas. Estas pérdidas dependen de una serie de características del sistema como pueden ser el diámetro o la velocidad del fluido, pero están muy relacionadas con el factor de fricción “f” que se trata de un valor adimensional que se puede obtener de diferentes formas. A partir de este factor y mediante alguna de las fórmulas existentes para el cálculo de pérdidas de carga como pueden ser la de Darcy o la de Fanning se puede obtener el valor de las pérdidas del tramo de tubería estudiado. Una manera frecuente de cuantificar las pérdidas de carga es en unidades de metros de columna de líquido, para poder ser comparados con la altura estática a la que se desea elevar el fluido.

Ecuación de Fanning:

$$h_f = \frac{4 \cdot f \cdot L \cdot v^2}{d \cdot 2g} \quad \text{Ecuación 5.2.1}$$

Ecuación de Darcy:

$$h_f = \frac{f \cdot L \cdot v^2}{d \cdot 2g} \quad \text{Ecuación 5.2.2}$$

Para el cálculo de las pérdidas singulares se utiliza el concepto de longitud equivalente que hace referencia a la longitud de tubería que produciría la misma pérdida de carga que la singularidad. Por tanto la longitud introducida en las ecuaciones anteriores será la suma de la longitud de la línea más la longitud equivalente de los accesorios que se encuentran en dicha línea. La longitud equivalente de los accesorios es un dato que puede estar tabulado o ser suministrado directamente por el fabricante. La unidad de estos datos suele estar en unidades de metro entre diámetro (m/d) por lo que al coeficiente obtenido de la tabla es necesario multiplicarle su diámetro interior para obtener la longitud equivalente.

Los fluidos pueden clasificarse de diferentes maneras y una de ellas es la clasificación del

régimen del fluido. Un fluido puede estar en régimen laminar o régimen turbulento, existiendo asimismo una zona de transición entre uno y otro que muchas veces es incluida dentro del régimen turbulento para simplificar. Para catalogar los diferentes fluidos según sean de régimen laminar o turbulento se utiliza el número de Reynolds que es un valor adimensional que se calcula de la siguiente forma:

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\mu} \quad \text{Ecuación 5.2.3}$$

Donde:

d es el diámetro en metros

v es la velocidad del fluido en m/s

$\rho$  es la densidad del fluido en kg/m<sup>3</sup>

$\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido en Pa·s

Una vez obtenido el valor del número de Reynolds se compara con el valor frontera ( $\approx 2000$ ), si es menor que este valor se trata de un régimen laminar y en caso de ser mayor que el valor frontera se trata de un régimen turbulento.

Una vez determinado el tipo de fluido se puede determinar el factor de fricción. En el caso de tener un fluido laminar el factor de fricción de Darcy se puede calcular como:

$$f_D = \frac{64}{Re} \quad \text{Ecuación 5.2.4}$$

Mientras que el factor de fricción de Fanning se puede calcular como:

$$f_F = \frac{16}{Re} = \frac{f_D}{4} \quad \text{Ecuación 5.2.5}$$

Según se vaya a utilizar la ecuación de Fanning o la ecuación de Darcy para el cálculo de las pérdidas de carga usaremos el factor de fricción correspondiente.

En el caso de tener un fluido con régimen turbulento, para la determinación del factor de

fricción es necesario recurrir al diagrama de Moody donde se relaciona el factor de fricción “ $f$ ” con el número de Reynolds y la rugosidad relativa, que depende del material y el proceso de fabricación de cada conducción y que suele ser suministrado por el fabricante.

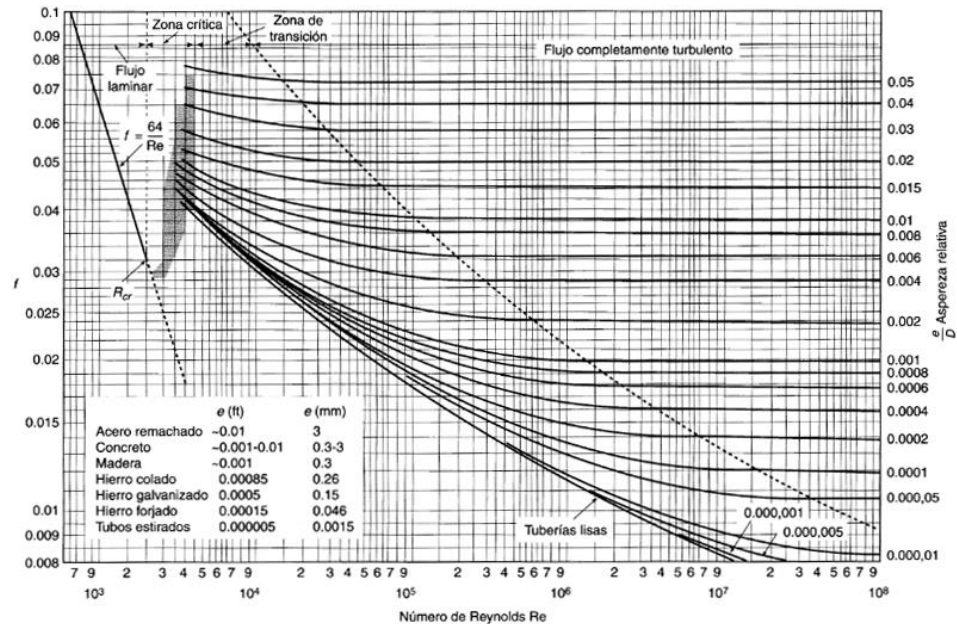


Diagrama de Moody. (De L.F. Moody, *Trans. ASME*, vol. 66, 1944.)

Fig. 5.2.1 Diagrama de Moody. [9]

### 5.3. NPSH

La carga neta positiva de aspiración o *Net Positive Suction Head* es un concepto importante del sistema, ya que indica si hay posibilidad de que se formen burbujas de vapor debido al vacío producido, que pueden derivar en que la bomba entre en cavitación reduciendo la carga útil de la misma y llegando a producir daños en esta.

En la figura 5.3.1 se puede ver qué sucede realmente cuando se produce cavitación en una bomba, dando lugar a las burbujas que provocan el desgaste de la máquina.



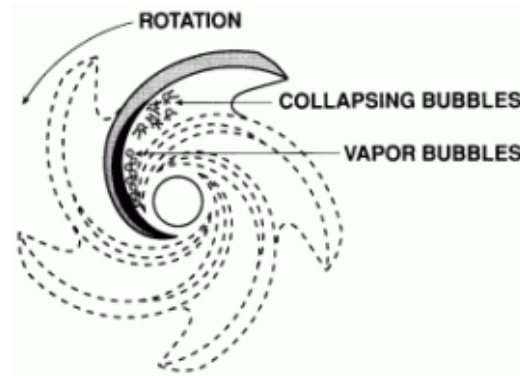


Fig. 5.3.1 Ilustración sobre el fenómeno de la cavitación. [10]

Se debe distinguir entre la NPSH disponible y la NPSH requerida. La requerida depende únicamente del diseño de la bomba, representando la energía necesaria para llenar la parte de aspiración de la bomba y vencer las pérdidas por rozamiento y aumento de velocidad desde la conexión de aspiración hasta el punto donde se incrementa la energía. Este valor viene suministrado por el fabricante y puede venir, como en el caso de la carga de la bomba, en forma de una curva que relaciona el caudal con la NPSH en metros.

La NPSH disponible es la diferencia entre la presión a la entrada de la bomba y la tensión de vapor del fluido, medidas en metros de columna de líquido. La NPSH disponible siempre tiene que ser mayor que la requerida. La fórmula asociada al cálculo de la NPSH disponible es la siguiente:

$$NPSH_d = P_{ASP} - T_v = P_{CONT} + \Delta z - l_w - T_v \quad \text{Ecuación 5.3.1}$$

Donde:

$P_{ASP}$ : Presión en la aspiración.

$T_v$ : Tensión de vapor.

$P_{CONT}$ : Presión en la contención.

$\Delta z$ : Diferencia de cotas entre el sumidero y la entrada de la bomba.

$l_w$ : Pérdidas de carga en la aspiración.

## 6. Obtención del modelo teórico

Como ya se ha mencionado la herramienta se basa en unos cálculos facilitados desde una central, que hacen referencia al sistema de aspersión de la contención en fase de recirculación. Para que los cálculos puedan serlo más parecidos posibles y exista la posibilidad de contrastarlos se han considerado los siguientes puntos:

- Se estudia únicamente uno de los trenes independientes.
- Tanto la aspiración como la impulsión están divididas en líneas que son tramos de diámetro constante.
- La temperatura, la viscosidad, la densidad y el volumen específico permanecen constantes en todo el sistema.
- Se obtienen dos puntos de funcionamiento, uno considerando el OR y otro sin considerarlo.
- Los resultados se presentan en unidades del S.I, pero la herramienta funciona con valores en el sistema anglosajón.

### 6.1. Datos del problema

La herramienta necesita una serie de datos para obtener un resultado. Al principio la hoja de cálculo da a elegir en que sistema de unidades se desean introducir los datos, siendo las posibilidades el sistema internacional de unidades o el sistema anglosajón o imperial, todo y que, el valor de la longitud de tubería solo se pueden introducir en metros. Por defecto se encuentran los datos actuales de la central, que son los que dan pie a los resultados que más adelante serán comentados. En caso de querer realizar alguna modificación estos son los parámetros que se pueden modificar:

- $\Delta z$  de la bomba: diferencia de altura entre la salida de sumidero o aspiración y el eje de la bomba.
- $\Delta z$  del sistema: diferencia de altura entre el anillo superior y la salida del sumidero o aspiración
- Caudal/Velocidad: El programa nos permite elegir entre una de estas dos magnitudes, ya que están directamente relacionadas a través de la sección. Esta magnitud no influye en el resultado final del programa, pero es útil si se desea conocer cómo funciona el sistema para una determinada velocidad o caudal.

- Densidad: Densidad del refrigerante utilizada para el cálculo de las pérdidas de carga
- Viscosidad: Viscosidad del refrigerante utilizado para el cálculo del N° de Reynolds y la determinación del régimen del fluido.
- Diámetro interior: Cada línea tiene un diámetro diferente que puede ser modificado, en ese caso habría que añadir un accesorio que fuese una reducción para el nuevo diámetro (actualmente hay dos 8'X10' y 6'x10') con su nuevo factor de I/D.
- Factor de fricción: Factor de fricción de cada tramo de tubería, utilizado para el cálculo de pérdidas de carga.
- Longitud de la línea: Longitud en metros de cada línea utilizada en el cálculo de pérdidas de carga.
- Valor de la I/D de los accesorios: valor para el cálculo de la longitud equivalente de cada accesorio. También se podrían añadir accesorios.
- Curvas de la bomba: Las curvas que caracterizan la bomba pueden ser modificadas en caso de tener otros valores.

Una modificación en el caudal o la velocidad no comporta cambios en el resultado final, ya que el resultado final que se obtiene es el punto de funcionamiento óptimo, es decir, el mínimo caudal impulsado por la bomba que permite vencer las cargas existentes en el sistema.

## 6.2. Pérdidas de carga

Como ya se ha mencionado en los objetivos de este proyecto, la finalidad de esta herramienta es proporcionar la curva del sistema, el punto de funcionamiento y el NPSH disponible de la bomba durante la fase de recirculación.

Para ello es necesario un programa que calcule las diferentes pérdidas de carga para los diferentes caudales, ya que estas formaran la curva del sistema la cual proporciona el punto de funcionamiento en la intersección con la curva de la bomba. Hay cuatro tipos de pérdidas de carga:

- Las pérdidas de carga por fricción que son cuantificables en función del caudal.
- Las pérdidas de carga debidas a la diferencia de alturas.
- Las pérdidas de carga por fricción que no son cuantificables en función del caudal (llamadas "pérdidas incógnita").
- Las pérdidas de cargas debido a un orificio restrictor (OR).

### 6.2.1. Pérdidas por fricción cuantificables

Son las pérdidas de carga por fricción que se calculan a partir del coeficiente de fricción. Estas pérdidas se calculan a partir de la caída de presión unitaria ( $\Delta p_{100'}$ ) en unidades del sistema anglosajón. Este valor representa la pérdida de presión causada por el rozamiento en 100' de tubería. Para calcular las pérdidas totales solo se tiene que multiplicar este resultado por la suma de la longitud de la línea más la longitud equivalente (en pies) y dividirla entre 100. La pérdida de presión unitaria se obtiene mediante una formula empírica proporcionada por diseñador del sistema. Esta fórmula es diferente si se trata de un líquido en régimen laminar o en régimen turbulento:

$$\text{Regimen Laminar} \rightarrow \Delta p_{100'} = \frac{0,0668 \cdot \mu \cdot v}{d^2} \quad \text{Ecuación 6.2.1}$$

$$\text{Regimen Turbulento} \rightarrow \Delta p_{100'} = \frac{0,1294 \cdot f \cdot \rho \cdot v^2}{d} \quad \text{Ecuación 6.2.2}$$

$$lw \text{ total (psi)} = \Delta p_{100'} \cdot \frac{l_{total} \text{ (pies)} + l_{equivalente} \text{ (pies)}}{100} \quad \text{Ecuación 6.2.3}$$

Para acabar se hace la conversión de psi a m.c.a mediante un factor de conversión para obtener el resultado en unidades del sistema internacional.

A la hora de obtener la longitud equivalente de los accesorios, para introducirla en la fórmula de la caída de presión como se ha mencionado anteriormente, se puede hacer de distintas formas. Los valores de los accesorios más comunes suelen estar tabulados o graficados en Vademécums de mecánica de fluidos, en cambio de algunos accesorios como las válvulas, se pueden encontrar en libros como el Crane donde se hacen aproximaciones según el tipo de válvula, pero lo mejor es obtener los valores a través del fabricante, ya que es el resultado que más se aproximará a la realidad. Otra forma de obtener los valores podría ser mediante la experimentación.

Finalmente la herramienta se ha confeccionado a partir de los valores que aparecen en los cálculos en los que se basa el proyecto, ante la imposibilidad de obtener un método único para el cálculo de todos los accesorios. A continuación aparece la lista de los accesorios y sus valores:

| Accesorios          | I/D unitaria |
|---------------------|--------------|
| Salida sumidero     | 0,78         |
| Codo 90°            | 20           |
| Codo 45°            | 10           |
| Válvula compuerta   | 13           |
| Reducción 10' x 8'  | 0,14         |
| Reducción 6' x 10'  | 0,4          |
| Tobera salida bomba | 0,5          |
| Te paso recto       | 20           |
| Te paso perforado   | 60           |
| Válvula retención   | 135          |

*Tabla 6.2.1 Lista de accesorios*

Estos valores son los de longitud/diámetro, que al multiplicarse por el diámetro, proporcionan la longitud equivalente del accesorio que posteriormente se suma en un cómputo global de accesorios para cada línea. De los accesorios cuya I/D es inferior a la unidad ("Salida sumidero", "Reducciones" y "Tobera salida bomba") se obtiene la longitud equivalente dividiendo este valor entre el factor de fricción "f" de cada línea. Los valores obtenidos son del orden de los accesorios que no dependen del factor de fricción.

$$\text{Longitud equivalente accesorio} = \frac{l/D}{f} \quad \text{Ecuación 6.2.4}$$

Como puede apreciarse las fórmulas utilizadas para este tipo de pérdidas dependen de la velocidad, por tanto, dependen indirectamente del caudal y es posible obtener un valor de pérdidas para cada valor del caudal.

### 6.2.2. Pérdidas de carga por diferencia de alturas

Conceptualmente no son pérdidas, sino más bien la energía necesaria para elevar un líquido a una cierta altura sin tener en cuenta la fricción. La mayor parte del trabajo de la bomba se invierte en vencer esta carga. Se mide en metros, y es la diferencia de cotas entre la salida del sumidero y la altura del punto más alto de la instalación, ya que la presión en el punto de

aspiración y en el de impulsión de la bomba es igual. También se define como la diferencia de altura estática en la impulsión menos la altura estática en la aspiración.

En el caso de estudio hay tres cotas documentadas:

$$\text{Altura anillo superior} = 93,8 \text{ m}$$

$$\text{Altura de la aspiración (salida sumidero)} = 34,22 \text{ m}$$

$$\text{Altura bomba} = 23,8 \text{ m}$$

Por tanto el líquido tiene que ser impulsado un  $\Delta z$  de:

$$\Delta z = 93,8 - 34,22 = 59,6 \text{ metros}$$

### 6.2.3. Pérdidas por fricción no cuantificables

Estas pérdidas no permiten obtener un valor de ellas para cada valor del caudal, ya que han sido subministradas directamente para el valor nominal del caudal. Son las siguientes:

- Pérdida de carga en el anillo superior (para 1500 gmp o  $340,56 \text{ m}^3/\text{h}$ ) = 1,7 psi = 1,19 m.c.a.
- Pérdida de carga en la tobera (para 1500 gmp o  $340,56 \text{ m}^3/\text{h}$ ) = 40 psi = 28,12 m.c.a.
- Pérdida de carga del medidor de caudal (para 1500 gmp o  $340,56 \text{ m}^3/\text{h}$ ) = 1,8 psi = 1,26 m.c.a.

Para poder dar un valor que dependiese del caudal a esta serie de pérdidas, se han juntado todas en una nueva variable llamada “pérdidas incógnita”. Estas pérdidas se han modelizado mediante una ecuación de segundo grado que se ha obtenido a partir de las diferencias de los resultados obtenidos por el programa y los resultados teóricos subministrados en los cálculos en los que se basa este proyecto. De esta forma se consigue tener una función donde las “pérdidas incógnita” dependen de la variable caudal.

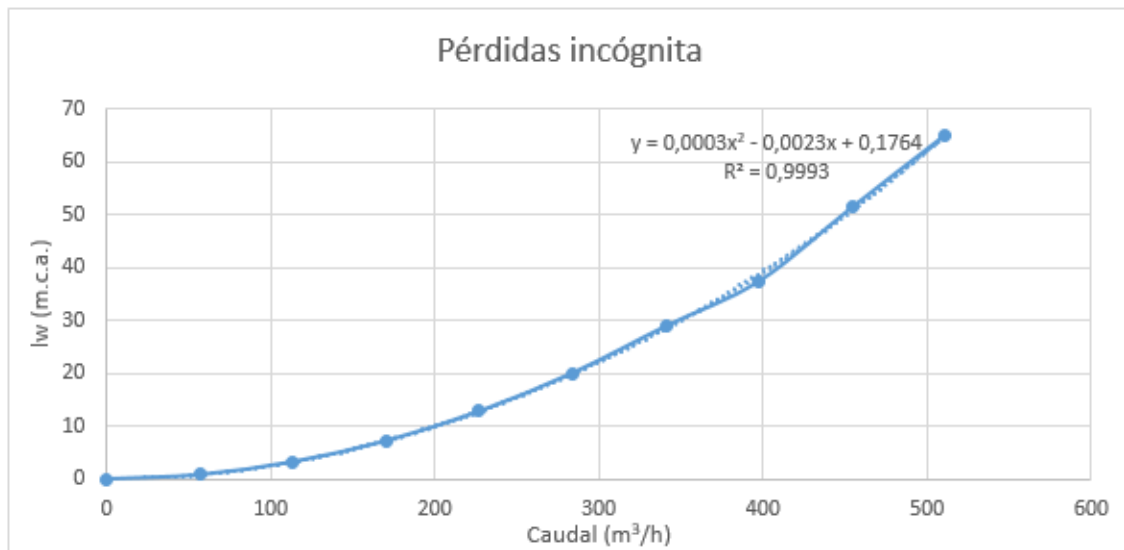


Fig. 6.2.1 Gráfica de "pérdidas incógnita" en función del caudal.

La ecuación modelizada representa la diferencia entre los valores de la columna lw sin OR y los valores de lw total de aspiración más descarga, obtenidos a partir de la herramienta siguiendo los cálculos indicados en el apartado anterior. En la siguiente tabla se pueden ver los resultados teóricos extraídos del documento base.

| Q (gpm) | Qw/lw | SIN OR |       | CON OR |       | (m.c.a.) |
|---------|-------|--------|-------|--------|-------|----------|
|         |       | lw⊕    | TDHR⊕ | lw⊕    | TDHR⊕ |          |
| 0       | 0     | 0      | 59.6  | 0      | 59.6  |          |
| 250     | 56.8  | 1.2    | 60.8  | 1.6    | 61.2  |          |
| 500     | 113.6 | 4.8    | 64.4  | 6.4    | 66.0  |          |
| 750     | 170.3 | 10.7   | 70.3  | 14.3   | 73.9  |          |
| 1000    | 227.2 | 19.0   | 78.6  | 25.5   | 85.1  |          |
| 1250    | 283.9 | 29.7   | 89.3  | 39.9   | 99.5  |          |
| 1500    | 340.7 | 42.8   | 102.4 | 57.5   | 117.0 |          |
| 1750    | 397.5 | 58.3   | 117.9 | 78.1   | 137.7 |          |
| 2000    | 454.4 | 76.1   | 135.7 | 102.1  | 161.7 |          |
| 2250    | 511.0 | 96.3   | 155.9 | 129.1  | 188.7 |          |

Fig. 6.2.2 Captura de la tabla de resultados de pérdidas de carga procedente de los documentos de origen.

Una vez obtenida la expresión de la curva, se substituye en ella el valor del caudal y se obtiene un valor aproximado de estas pérdidas de carga, que serán incluidas en el total de pérdidas de carga.

#### 6.2.4. Pérdidas de carga debidas al Orificio Restrictor

El orificio restrictor u OR se trata de un sistema que actúa como si fuera una válvula. Es un pequeño orificio que sirve para controlar el caudal de refrigerante que queremos que circule por las tuberías de nuestro sistema.

Estas pérdidas se han calculado de una forma similar a las anteriores (apartado 6.2.3) ya que el dato proporcionado sobre el OR es únicamente válido para el caudal nominal. Por tanto las pérdidas debidas a la existencia de un OR se han modelizado calculando la diferencia entre las pérdidas teóricas con OR y las teóricas sin OR. Finalmente se obtiene la expresión matemática e introduciendo caudales en ella se obtienen valores de las pérdidas de carga producidas por el OR.

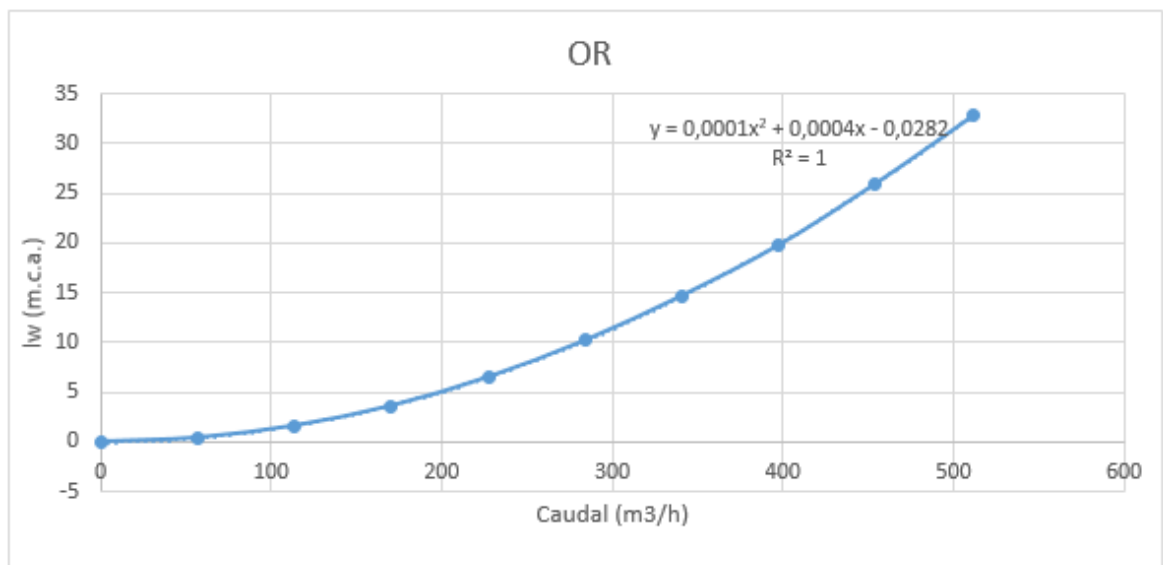


Fig. 6.2.3 Gráfica de pérdidas debidas al OR en función del caudal.

Al haber calculado todas las pérdidas de carga en metros columna de agua, para obtener el resultado total de la carga de la bomba simplemente se suman los metros de la diferencia de alturas más todas las pérdidas en m.c.a., ya que esta unidad de presión equivale a la presión ejercida por una columna de un metro de agua.

### 6.3. NPSH

La herramienta hace un cálculo de la NPSH disponible para confeccionar el gráfico de NPSH y ver si es posible que exista cavitación. Para obtener el resultado se aplica la fórmula 5.3.1:



$$NPSH_d = P_{ASP} - T_v = P_{CONT} + \Delta z - lw - T_v$$

Al considerar el equilibrio entre la tensión de vapor y la presión en el interior de la contención, la formula queda de la siguiente forma:

$$NPSH_d = \Delta z - lw$$

El sumidero se encuentra a una altura de 34,221 metros, mientras que la entrada de la bomba está situada a 23,8. Por tanto existe una diferencia de cotas de 10,42 m y se obtiene así la siguiente expresión:

$$NPSH_d = 10,42 - lw(Q)$$

A partir de esta ecuación se puede obtener la curva del NPSH disponible en función del caudal, ya que únicamente aparecen en ella las pérdidas de carga que a su vez solo dependen del caudal.

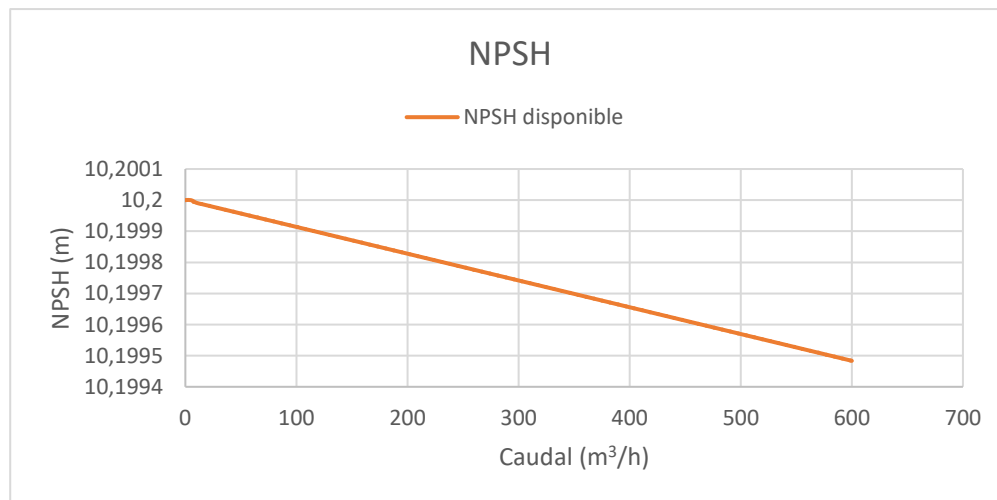


Fig. 3.3.1 Gráfica de la NPSH disponible en función del caudal.

## 6.4. Curvas y puntos de funcionamiento

Una vez encontradas tanto las pérdidas como las curvas de NPSH, se procede a obtener de forma gráfica las curvas del sistema y puntos de funcionamiento, que son el objetivo de este programa.

Tanto la curva característica de la bomba, en la que se relacionan la cantidad de carga que puede impulsar para cada caudal, como la curva de la NPSH requerida son datos proporcionados por el fabricante. En la herramienta han sido introducidos punto a punto a partir de un gráfico proporcionado en los cálculos en los que se basa este proyecto, lo que ha permitido poder acceder a estas curvas ante la imposibilidad de obtenerlas del fabricante. Estas curvas son necesarias para obtener el punto de funcionamiento del sistema, a partir de la intersección de estas con las curvas del sistema. Los valores han sido introducidos en la hoja de cálculo llamada 'Curvas Bomba' y en caso de querer modificar estos valores como consecuencia de un cambio de bomba bastaría con introducirlos en forma de tabla como se encuentran actualmente.

Las curvas del sistema en cambio se obtienen graficando el conjunto de todas las pérdidas vistas en el apartado anterior en función del caudal, y se obtiene una gráfica como la siguiente:

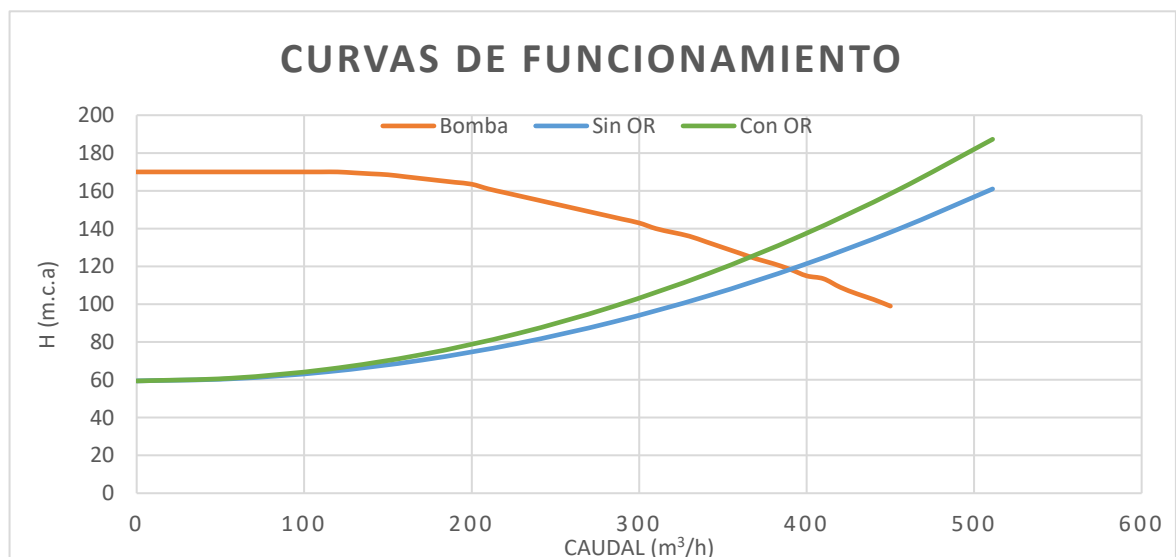


Fig. 6.4.1 Curvas del sistema y de la bomba en función del caudal.

Se puede observar que hay dos curvas del sistema, una perteneciente al sistema considerando el OR (color verde) y otra sin considerarlo (color azul). Los puntos de funcionamiento serán aquellos donde la curva de la bomba (color naranja) corte a cada una de las curvas del sistema.

Este software no es capaz de calcular el punto donde ambas curvas se encuentran por lo tanto se ha tenido que calcular aparte. Para ello se realiza un sistema de ecuaciones a partir de la ecuación de la curva, que se ha aproximado mediante una ecuación polinómica de segundo grado de la forma siguiente:

$$y = Ax^2 + Bx + C$$

Ecuación 6.4.1

Resolviendo el sistema de dos ecuaciones determinado, se encuentra el valor de la x donde se cortan las curvas, es decir, el valor del caudal que comparten ambas, y por tanto el caudal mínimo impulsado por la bomba que permite vencer todas las pérdidas del sistema. El punto de funcionamiento se trata de este caudal, sus pérdidas en m.c.a. asociadas, y la por último la NPSH de ese punto.

Para la NPSH del punto de funcionamiento se utiliza una gráfica aparte, donde están incluidas la NPSH disponible y la requerida.

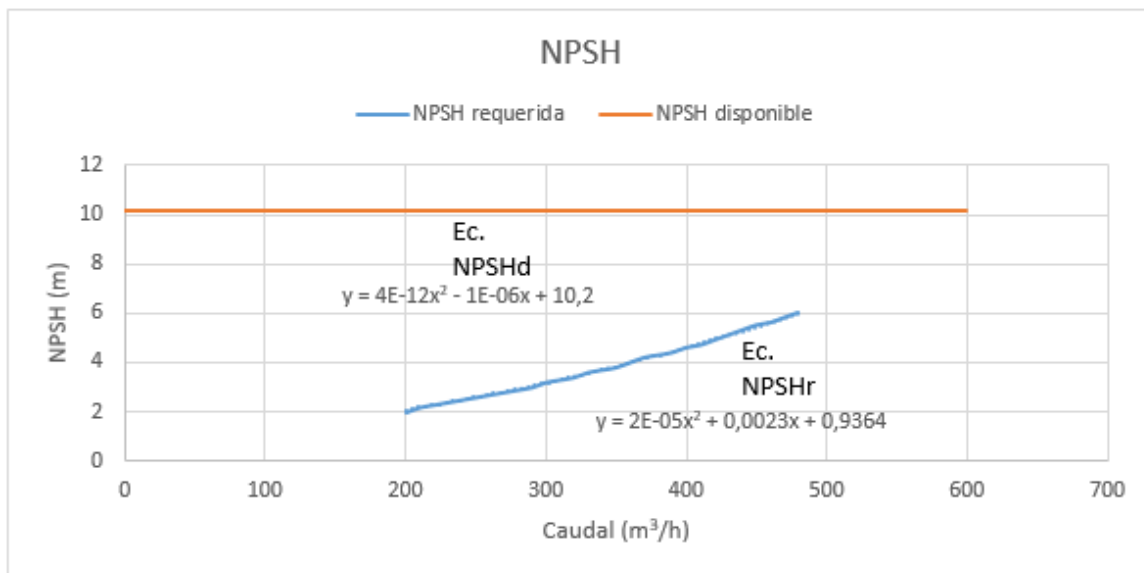


Fig. 6.4.2 Gráfica NPSH

Para ver la NPSH del punto de funcionamiento, se introduce el caudal en las ecuaciones obtenidas de las dos NPSH y se obtienen los resultados de ambas en metros.

En caso de que la disponible sea superior a la requerida la bomba estará funcionando de forma correcta.

## 6.5. Resultados

Los resultados obtenidos por la herramienta se visualizan en la primera hoja, justo debajo del lugar donde se introducen los datos. Los resultados están formados por una gráfica donde se incluyen las curvas del sistema y bomba, y el valor numérico de los puntos de funcionamiento de la siguiente forma:

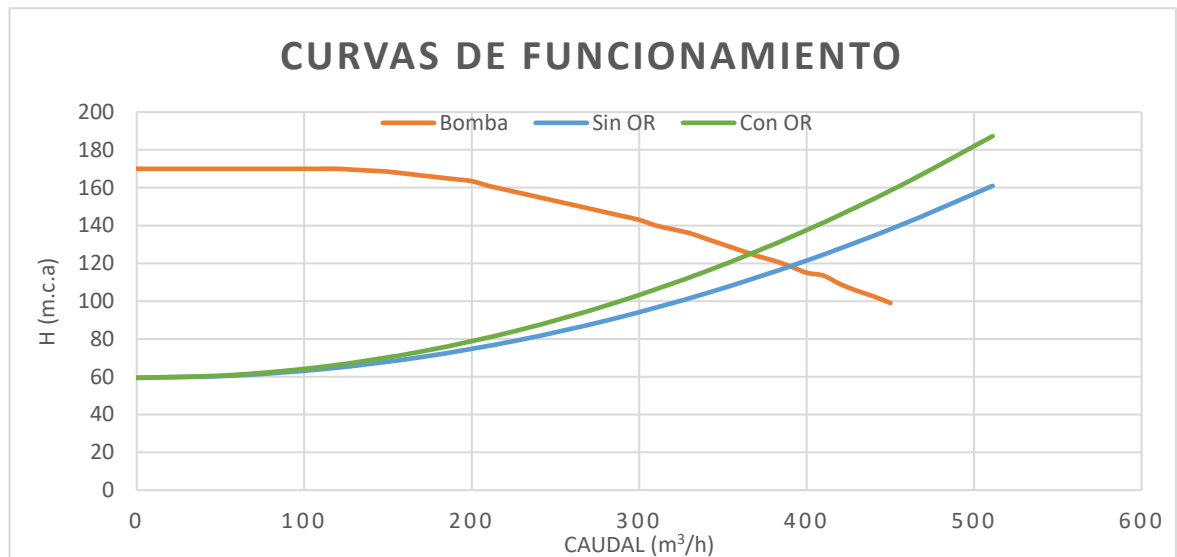


Fig. 6.5.1 Gráfica con las curvas del sistema y de la bomba.

| Puntos de funcionamiento |        |
|--------------------------|--------|
| Sin OR                   |        |
| Q (m <sup>3</sup> /h)    | 384,61 |
| H (m.c.a.)               | 118,06 |
| NPSHd (m)                | 10,20  |
| NPSHr (m)                | 4,78   |
| NPSHd > NPSHr            | OK!    |
| Con OR                   |        |
| Q (m <sup>3</sup> /h)    | 362,87 |
| H (m.c.a.)               | 124,90 |
| NPSHd (m)                | 10,20  |
| NPSHr (m)                | 4,40   |
| NPSHd > NPSHr            | OK!    |

Fig. 4 Captura de los resultados para el punto de funcionamiento.

En ambos casos aparecen el caudal, la carga que vence la bomba (TDH) y ambas NPSH. Por último en la última fila de cada situación (con OR y sin OR), aparece una comparativa entre las NPSH requeridas y disponibles. En caso de ser la disponible mayor o igual que la requerida, condición que se tiene que cumplir para el buen funcionamiento, aparece un mensaje de "OK!", y en caso contrario el mensaje sería "ERROR".

## 6.6. Comprobación de resultados

Para hacer una comparativa entre los resultados obtenidos por la herramienta con los proporcionados desde la central se han realizado dos fases. En la primera se comparan los resultados obtenidos únicamente de las pérdidas de carga para el caudal nominal y en la segunda se comparan los valores de los puntos de funcionamiento obtenidos.

### 6.6.1. Pérdidas para caudal nominal

A continuación aparecen los cálculos de pérdidas de carga para el caudal nominal de 1500 gpm o 340,7 m<sup>3</sup>/h. Se tratan de los resultados de las llamadas pérdidas de carga por fricción cuantificables. A este resultado se tendrían que añadir las pérdidas no cuantificables y las pérdidas del OR, en caso de que estuviese presente en el sistema, para obtener las pérdidas de carga totales.

#### A. Zona aspiración

##### A.1 Línea 1

Datos:

$$Longitud\ recta = 30,6\ m$$

$$Coeficiente\ de\ fricción = 0,0139$$

$$Diámetro\ interior\ línea = 0,254\ m$$

$$Sección = 0,05067\ m^2$$

$$Caudal = 340,56\ m^3/h$$

$$Velocidad = 1,867\ m/s$$

$$Viscosidad = 0,000305\ Pa \cdot s$$

$$Densidad = 962,82\ Kg/m^3$$

$$N^{\circ}\ Reynolds = 2246291,258 > 2000 \rightarrow R.TURBULENTO$$

Longitud equivalente:

| Accesorios        | l/D unitaria | Cantidad | l/D        |
|-------------------|--------------|----------|------------|
| Salida sumidero   | 56,11510791  | 1        | 56,1151079 |
| Válvula compuerta | 13           | 1        | 13         |
| Te paso recto     | 20           | 1        | 20         |
| Codo 90°          | 20           | 7        | 140        |

Tabla 6.6.1 Accesorios línea 1 de la aspiración.

$$Total\ l/D = 229,115$$

$$Longitud\ equivalente = 58,195\ m$$

En esta línea hay una rejilla anti turbulencias con unas pérdidas de 0,7 mm.c.a. que se consideran despreciables.

Resultados línea:

$$Longitud\ total = 88,795\ m$$

$$lw = 0,8383\ m.\ c.\ a.$$

A.2 línea 2

Datos:

$$Longitud\ recta = 1,166\ m$$

$$Coeficiente\ de\ fricción = 0,0145$$

$$Diámetro\ interior\ línea = 0,203\ m$$

$$Sección = 0,0323\ m^2$$

$$Caudal = 340,56\ m^3/h$$

$$Velocidad = 2,923\ m/s$$

$$Viscosidad = 0,000305\ Pa \cdot s$$

$$Densidad = 962,82\ Kg/m^3$$

$$N^{\circ}\ Reynolds = 2810630,442 > 2000 \rightarrow R.TURBULENTO$$

Longitud equivalente:

| Accesorios         | l/D unitaria | Cantidad | l/D        |
|--------------------|--------------|----------|------------|
| Reducción 10' x 8' | 9,655172414  | 1        | 9,65517241 |
| Codo 90°           | 20           | 1        | 20         |

Tabla 6.6.2 Accesorios línea 2 de la aspiración.

$$Total\ l/D = 29,655$$

$$Longitud\ equivalente = 58,195\ m$$

Resultados línea:

$$Longitud\ total = 7,186\ m$$

$$lw = 0,217\ m.c.a.$$

$$lw\ total\ aspiración = 1,05\ m.c.a.$$

B. Zona descarga

B.1 Línea 1

Datos:

$$Longitud\ recta = 1,484\ m$$

$$Coeficiente\ de\ fricción = 0,0151$$

$$Diámetro\ interior\ línea = 0,1524\ m$$

$$Sección = 0,018\ m^2$$

$$Caudal = 340,56\ m^3/h$$

$$Velocidad = 5,186\ m/s$$

$$Viscosidad = 0,000305\ Pa \cdot s$$

$$Densidad = 962,82\ Kg/m^3$$

$$N^{\circ}\ Reynolds = 3743818,764 > 2000 \rightarrow R.TURBULENTO$$

Longitud equivalente:

| Accesorios          | l/D unitaria | Cantidad | l/D        |
|---------------------|--------------|----------|------------|
| Tobera salida bomba | 33,11258278  | 1        | 33,1125828 |
| Codo 90°            | 20           | 1        | 20         |
| Reductor 6' x 10'   | 26,49006623  | 1        | 26,4900662 |

Tabla 6.6.3 Accesorios línea 1 de la descarga.

$$Total\ l/D = 79,602$$

$$Longitud\ equivalente = 12,132\ m$$

Resultados línea:

$$Longitud\ total = 13,616\ m$$

$$lw = 1,795\ m.c.a.$$

B.1 Línea 2

Datos:

$$Longitud\ recta = 76,47\ m$$

$$Coeficiente\ de\ fricción = 0,0139$$

$$\text{Diámetro interior línea} = 0,254 \text{ m}$$

$$\text{Sección} = 0,05067 \text{ m}^2$$

$$\text{Caudal} = 340,56 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidad} = 1,867 \text{ m/s}$$

$$\text{Viscosidad} = 0,000305 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\text{Densidad} = 962,82 \text{ Kg/m}^3$$

$$N^{\circ} \text{ Reynolds} = 2246291,258 > 2000 \rightarrow R. \text{TURBULENTO}$$

Longitud equivalente:

| Accesorios         | l/D unitaria | Cantidad | l/D        |
|--------------------|--------------|----------|------------|
| Válvula retención  | 135          | 2        | 270        |
| Codo 90°           | 20           | 16       | 320        |
| Codo 45°           | 10           | 5        | 50         |
| Válvula compuerta  | 13           | 3        | 39         |
| Te paso recto      | 20           | 1        | 20         |
| Reducción 10' x 8' | 10,07194245  | 1        | 10,0719424 |

Tabla 6.6.4 Accesorios línea 2 de la descarga.

$$\text{Total l/D} = 709,072$$

$$\text{Longitud equivalente} = 180,104 \text{ m}$$

Resultados línea:

$$\text{Longitud total} = 256,574 \text{ m}$$

$$lw = 2,422 \text{ m. c. a.}$$

### B.1 Línea 3

Datos:

$$\text{Longitud recta} = 65 \text{ m}$$

$$\text{Coeficiente de fricción} = 0,0145$$

$$\text{Diámetro interior línea} = 0,2032 \text{ m}$$

$$\text{Sección} = 0,032 \text{ m}^2$$

$$\text{Caudal} = 340,56 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidad} = 2,917 \text{ m/s}$$

$$\text{Viscosidad} = 0,000305 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\text{Densidad} = 962,82 \text{ Kg/m}^3$$

$$N^{\circ} \text{ Reynolds} = 2807864,073 > 2000 \rightarrow R. \text{TURBULENTO}$$

Longitud equivalente:



| Accesorios        | l/D unitaria | Cantidad | l/D |
|-------------------|--------------|----------|-----|
| Codo 90°          | 20           | 6        | 120 |
| Codo 45°          | 10           | 5        | 50  |
| Te paso perforado | 60           | 2        | 120 |

Tabla 6.6.5 Accesorios línea 3 de la descarga.

$$\text{Total } l/D = 290$$

$$\text{Longitud equivalente} = 58,928 \text{ m}$$

Resultados línea:

$$\text{Longitud total} = 123,928 \text{ m}$$

$$lw = 3,724 \text{ m. c. a.}$$

#### B.1 Línea 4

Datos:

$$\text{Longitud recta} = 11,2 \text{ m}$$

$$\text{Coeficiente de fricción} = 0,0155$$

$$\text{Diámetro interior línea} = 0,1524 \text{ m}$$

$$\text{Sección} = 0,018 \text{ m}^2$$

$$\text{Caudal} = 170,28 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Velocidad} = 2,593 \text{ m/s}$$

$$\text{Viscosidad} = 0,000305 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$\text{Densidad} = 962,82 \text{ Kg/m}^3$$

$$N^{\circ} \text{ Reynolds} = 1871909,382 > 2000 \rightarrow R. \text{TURBULENTO}$$

Longitud equivalente:

| Accesorios        | l/D unitaria | Cantidad | l/D |
|-------------------|--------------|----------|-----|
| Codo 90°          | 20           | 2        | 40  |
| Te paso perforado | 60           | 2        | 120 |

Tabla 1.6.6 Accesorios línea 4 de la descarga.

$$\text{Total } l/D = 160$$

$$\text{Longitud equivalente} = 24,384 \text{ m}$$

Resultados línea:

$$\text{longitud total} = 35,584 \text{ m}$$

$$lw = 1,204 \text{ m. c. a.}$$

\*En esta línea el caudal se reduce a la mitad a causa de una ramificación.

#### B.1 Línea 5

Datos:

$$Longitud\ recta = 9\ m$$

$$Coeficiente\ de\ fricción = 0,017$$

$$Diámetro\ interior\ línea = 0,102\ m$$

$$Sección = 0,008\ m^2$$

$$Caudal = 71,517\ m^3/h$$

$$Velocidad = 2,418\ m/s$$

$$Viscosidad = 0,000305\ Pa \cdot s$$

$$Densidad = 962,82\ Kg/m^3$$

$$N^{\circ}\ Reynolds = 1171686,946 > 2000 \rightarrow R.TURBULENTO$$

Longitud equivalente:

| Accesorios | l/D unitaria | Cantidad | l/D |
|------------|--------------|----------|-----|
| Codo 90°   | 20           | 2        | 40  |

Tabla 6.6.2 Accesorios línea 5 de la descarga.

$$Total\ l/D = 40$$

$$Longitud\ equivalente = 4,09\ m$$

Resultados línea:

$$longitud\ total = 13,090\ m$$

$$lw = 0,630\ m.c.a.$$

\*En esta línea el caudal se reduce algo menos de una cuarta parte debido a las diferentes ramificaciones del sistema en su última etapa.

$$\underline{lw\ total\ descarga = 9,77\ m.c.a.}$$

La siguiente tabla ilustra la comparativa entre los resultados obtenidos por el programa y los valores de partida. Las pérdidas que aparecen hacen referencia a las pérdidas cuantificables y a las “pérdidas incógnita” ya sumadas, pero sin tener en cuenta la altura (se tienen en cuenta posteriormente en el TDH). Para encontrar el error relativo se ha aplicado la siguiente fórmula:

$$Error\ relativo(\%) = \frac{valor_{obtenido} + valor_{real}}{valor_{real}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 6.6.1}$$

Donde:

$valor_{obtenido}$  es el valor obtenido de la herramienta

$valor_{real}$  es el valor que figura en los cálculos originales

|                        | Pérdidas de carga | Pérdidas de carga + OR | TDHr sin OR | TDHr con OR |
|------------------------|-------------------|------------------------|-------------|-------------|
| Resultados Herramienta | 45,05             | 56,77                  | 104,65      | 116,37      |
| Resultados originales  | 42,8              | 57,4                   | 102,4       | 117         |
| Error relativo (%)     | -5,27             | 1,10                   | -2,20       | 0,54        |

Tabla 6.6.3 Resultados pérdidas de carga.

Las unidades están en m.c.a. y metros.

### 6.6.2. Puntos de funcionamiento

Los resultados obtenidos de los puntos de funcionamiento son los que se han mostrado anteriormente:

| Puntos de funcionamiento |        |
|--------------------------|--------|
| Sin OR                   |        |
| Q (m <sup>3</sup> /h)    | 384,61 |
| H (m.c.a.)               | 118,06 |
| NPSHd (m)                | 10,20  |
| NPSHr (m)                | 4,78   |
| NPSHd > NPSHr            | OK!    |
| Con OR                   |        |
| Q (m <sup>3</sup> /h)    | 362,87 |
| H (m.c.a.)               | 124,90 |
| NPSHd (m)                | 10,20  |
| NPSHr (m)                | 4,40   |
| NPSHd > NPSHr            | OK!    |

Fig. 5 Captura resultados de los puntos de funcionamiento.

Como se ha hecho en el apartado anterior se realiza una comparación de estos resultados

con los resultados llamados teóricos, que se tratan de los resultados de los cálculos en los que se basa el proyecto.

|                        | Sin OR |        |        |       | CON OR |        |        |        |
|------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
|                        | Caudal | H      | NPSHd  | NPSHr | Caudal | H      | NPSHd  | NPSHr  |
| Resultados Herramienta | 384,61 | 118,06 | 10,20  | 4,78  | 362,87 | 124,90 | 10,20  | 4,40   |
| Resultados originales  | 397    | 116,8  | 9      | 4,5   | 366    | 125    | 9,2    | 4      |
| Error relativo (%)     | 3,12   | -1,08  | -13,33 | -6,21 | 0,85   | 0,08   | -10,87 | -10,11 |

Tabla 6.6.4 Resultados de los puntos de funcionamiento.

Las unidades del caudal son m<sup>3</sup>/h, las de las pérdidas “H” son m.c.a, mientras que las NPSH tienen unidades de metros.

## 6.7. Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos de la herramienta una vez comparados con los resultados reales, han dado un buen resultado. Esta conclusión está basada en el cálculo realizado del error relativo que poseen los resultados obtenidos del programa. Normalmente se considera como aceptable un error relativo de hasta un 5%. Examinando los errores obtenidos en los valores de pérdidas de carga para el caudal nominal, se puede apreciar como en el TDH, que realmente es el parámetro importante, porque es el que se tiene en cuenta para la construcción de la curva el error es en ambos casos (con y sin OR) inferior al 2,5%. Las pérdidas de carga sin OR y sin altura estática poseen un error mayor de aproximadamente el 5,3%, valor que está en el límite de lo aceptable, pero como se aprecia que este error más adelante se compensa en el valor del TDH, se da por bueno.

En el caso de los puntos de funcionamiento los errores tanto en el caudal como en la carga del sistema son del orden del 1%, a excepción del caudal del estudio sin OR que tiene un error del 3,12%. La NPSH tiene un error mayor alrededor del 10%, lo cual es inaceptable ya que dobla el valor propuesto como límite. El cálculo ha sido revisado y la discrepancia ha sido notificada al responsable pertinente. Lo importante es que sigue habiendo gran distancia entre la NPSH disponible y la requerida, lo que garantiza el buen funcionamiento de la bomba.

Los errores obtenidos (NPSH aparte) son aceptables dentro del margen impuesto. Estos errores se deben a multitud de factores, como pueden ser las aproximaciones de decimales realizadas, el cambio de unidades que se lleva a cabo a la hora del cálculo de pérdidas, el hecho de tener unas “pérdidas incógnita” y pérdidas debidas al OR que se han calculado mediante una modelización, etc.



## 7. Diseño de la herramienta

El principal objetivo a la hora de diseñar la herramienta es intentar conseguir una herramienta que sea fácil de utilizar. En este proyecto esto se ha intentado mediante una serie de pestañas, menús desplegables, operaciones automáticas, etc.

Se ha realizado una programación compleja pero sin tener que llegar a escribir código, y por tanto a continuación hay una breve explicación sobre los aspectos que son menos conocidos y que han sido utilizados para diseñar este proyecto con Microsoft Excel.

- Menús desplegables: Los menús desplegables sirven para elegir entre más de una opción. Se han empleado para escoger el sistema de unidades, la magnitud dato y los accesorios del sistema.

| Accesorios          | I/D unitaria |
|---------------------|--------------|
| Tobera salida bomba | 33,11258278  |
| Salida sumidero     | 20           |
| Codo 90°            | 26,49006623  |
| Codo 45°            |              |
| Válvula compuerta   | 0            |
| Reducción 10" x 8"  | 0            |
| Reductor 6" x 10"   | 0            |
| Tobera salida bomba | 0            |
| Tubo paso recto     | 0            |
| -                   | 0            |
| -                   | 0            |
| -                   | 0            |
| -                   | 0            |
| -                   | 0            |

Fig. 6 Captura de un menú desplegable.

Para ello se realizan una serie de operaciones. En primer lugar se tienen que definir todos los ítems que se incluirán en la lista desplegable en la misma hoja o en una hoja diferente.

A continuación se selecciona la celda en la que se desea situar un menú desplegable y se aplica el itinerario Datos → Validación de datos...

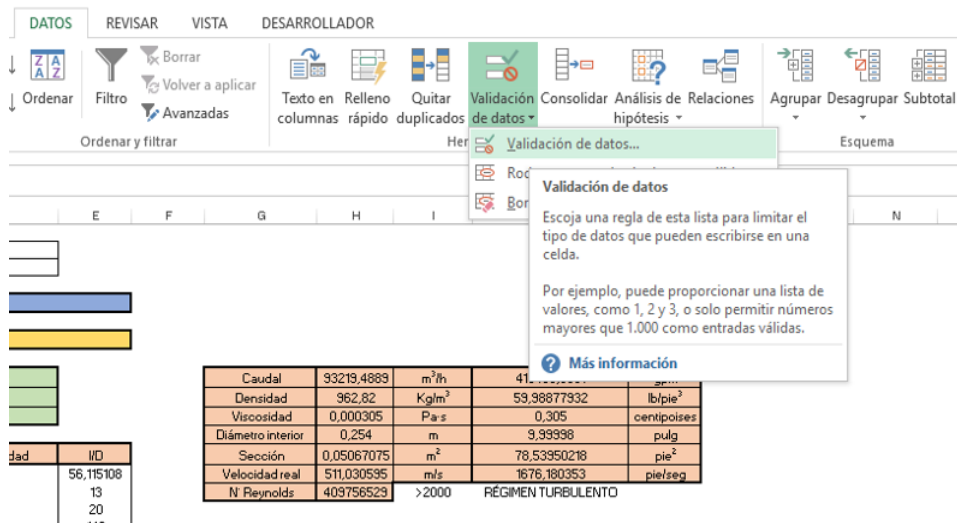


Fig. 7 Captura del itinerario a seguir para conseguir un menú desplegable.

Una vez hecho esto se abre una ventana donde se tienen que indicar que celdas ocupan los ítems que se quieren incluir en la lista desplegable. Después de esto el desplegable ya está creado y se puede acceder a los elementos que lo forman con facilidad. El proceso para obtener estos menús desplegables está más detallado en el capítulo 8 de este trabajo donde figuran las instrucciones de uso.

- Funciones SI anidadas: se trata de funciones condicionales en las que se puede incluir más de un elemento. Las funciones SI de Excel tienen la siguiente forma:

$$= \text{SI}(\text{condición}; \text{evento si TRUE}; \text{evento si FALSE})$$

Es decir se impone una condición y la función nos devuelve un valor diferente según si se cumple o no la condición inicial.

Las funciones anidadas son un poco diferentes, pero se basan en el mismo principio. Su forma es la siguiente:

$$= \text{SI}(\text{condición 1}; \text{evento si 1 TRUE}; \text{SI}(\text{condicion 2}; \text{evento si dos TRUE}; \text{SI}(\text{condicion 3 ... })))$$

Esta función proporciona un valor si una condición es cierta, en caso de que no lo sea, pasa a comprobar la siguiente y si esta se cumple proporciona el valor asociado a esta, pero si no se cumple pasa a verificar la siguiente condición y así hasta encontrar una que se cumpla o recorrer todas las condiciones que se incluyan en la fórmula.

- **Macros:** Se ha utilizado una macro con la intención de automatizar un proceso que de otra manera se tendría que realizar de forma repetitiva cada vez. Lo que hace la macro de Excel es grabar todas las acciones que se realizan en el Excel entre dos instantes. Posteriormente se inserta un botón y se le asigna la macro. De esta forma cada vez que se hace “click” en este botón la macro realiza todas las operaciones que ha grabado anteriormente.

A continuación se muestra como se ha realizado el diseño de cada una de las hojas del libro de Excel en el que se ha realizado la herramienta.

Tanto en este capítulo como en el siguiente (Instrucciones de uso) aparecen figuras que se tratan de capturas de pantalla del documento de Excel que contienen muchos números decimales. Esto es así debido a que estos valores parten de unos datos que se obtienen de factores de conversión lo que en ocasiones proporciona números con gran cantidad de decimales. Dentro de la herramienta no se ha considerado necesario ocultar estos decimales, pero a la hora de presentar unos resultados se tiene que realizar de otra manera. Las tablas que contienen los resultados sí que se han adaptado para que simplemente aparezcan hasta las centésimas y de esta forma dar resultados precisos sin ser engorrosos.

## 7.1. Datos y resultados

En esta hoja se introducen los primeros datos, los que llevan a modificaciones más simples, se elige cual es la magnitud dato y en qué sistema de unidades se quieren introducir los datos. En la parte inmediatamente inferior de la hoja se visualizan los resultados obtenidos. Los resultados que son generados son tanto las curvas de funcionamiento y NPSH, como el punto de funcionamiento del sistema.

| Datos                  |            |                   |
|------------------------|------------|-------------------|
| Sistema de unidades    | S.I.       |                   |
| Magnitud dato          | Caudal     |                   |
| $\Delta z$ bomba (m)   | 10,2       |                   |
| $\Delta z$ sistema (m) | 59,6       |                   |
| Caudal                 | 511,030595 | m <sup>3</sup> /h |
| Densidad               | 962,82     | Kg/m <sup>3</sup> |
| Viscosidad             | 0,000305   | Pa·s              |

Fig. 7.1.1 Captura de las tablas de datos.



| Puntos de funcionamiento |        |
|--------------------------|--------|
| Sin OR                   |        |
| Q (m <sup>3</sup> /h)    | 384,61 |
| H (m.c.a.)               | 118,06 |
| NPSHd (m)                | 10,20  |
| NPSHr (m)                | 4,78   |
| NPSHd > NPSHr            | OK!    |

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Con OR                |        |
| Q (m <sup>3</sup> /h) | 362,87 |
| H (m.c.a.)            | 124,90 |
| NPSHd (m)             | 10,20  |
| NPSHr (m)             | 4,40   |
| NPSHd > NPSHr         | OK!    |

Fig. 7.1.2 Captura de las tablas de resultados.

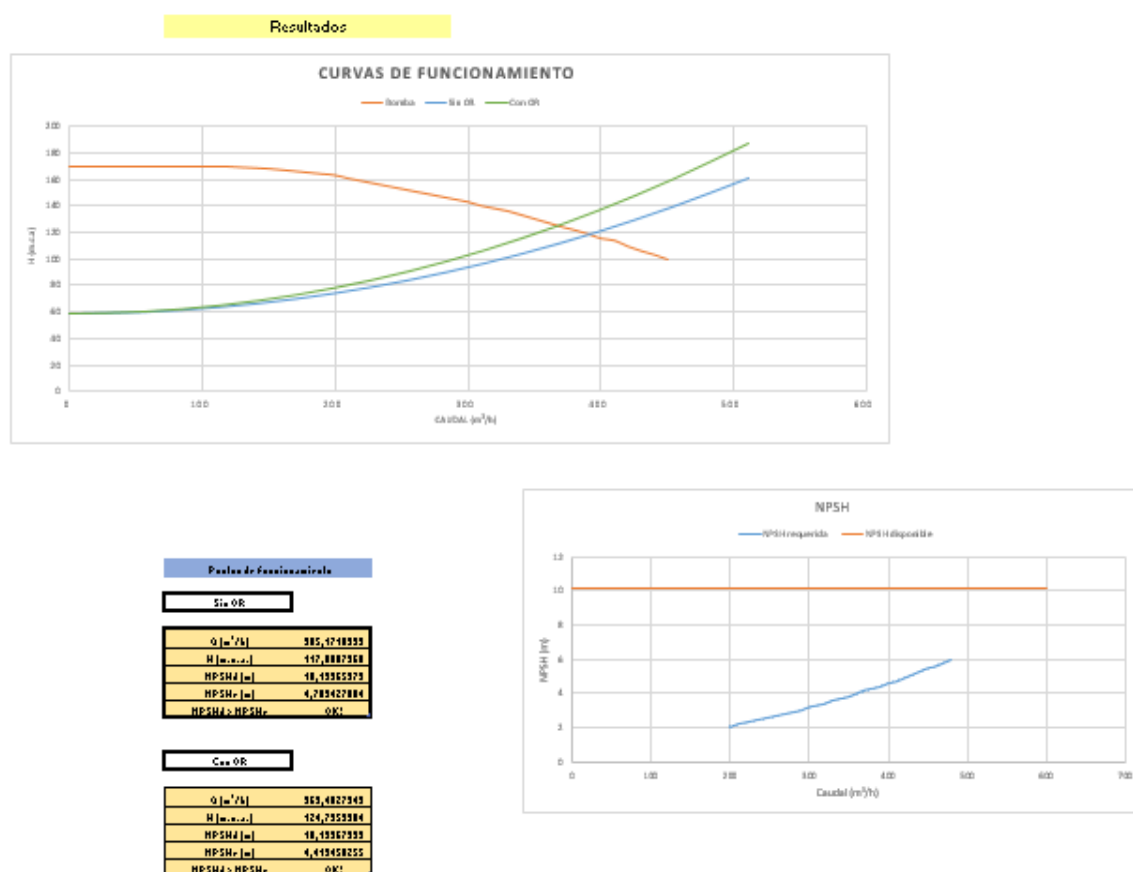


Fig. 7.1.3 Vista general de los resultados.

La parte de datos está formada por tres tablas; la tabla superior permite la elección del sistema de unidades y de la magnitud dato mediante dos menús desplegables, la segunda tabla permite introducir datos relacionados con las alturas siempre en metros, sea cual sea la opción de sistema de unidades elegida, y por último la tercera tabla que es de color rojo está programada para actualizarse según las opciones escogidas en la primera tabla. Es donde se introducen los datos de “Caudal/Velocidad”, “Densidad” y “Viscosidad” en las unidades seleccionadas anteriormente.

Los menús desplegables se han confeccionado como se ha explicado anteriormente, mientras que para conseguir que la tabla roja presente unas unidades en un sistema u otro y contenga el caudal o la velocidad, según se haya escogido todo en la primera tabla, se han utilizado funciones SI anidadas. Estas funciones contienen condiciones del tipo:

$$\text{si sistema de unidades} = \text{sistema internacional} \rightarrow \text{Kg/m}^3$$

$$\text{si sistema de unidades} \neq \text{sistema internacional} \rightarrow \text{lb/pe}^3$$

En el caso del caudal se trata de una función más complicada, ya que hay cuatro valores posibles: Caudal en S.I, Caudal en imperial, Velocidad en S.I. y velocidad en imperial. Para ello dentro de la función SI se tienen que introducir la función Y para poder indicar que se tienen que cumplir a la vez dos condiciones. A continuación se adjunta la ecuación:

$$=SI(Y(E\$4=Accesorios!F2;E\$5=Accesorios!H2);Accesorios!F6;SI(Y(E\$4=Accesorios!F2;E\$5=Accesorios!H3);Accesorios!F10;SI(Y(E\$4=Accesorios!F3;E\$5=Accesorios!H2);Accesorios!G6;SI(Y(E\$4=Accesorios!F3;E\$5=Accesorios!H3);Accesorios!G10))))$$

Traducido sería de la siguiente forma:

$$=SI(Y(sistema\_de\_unidades=S.I.;Magnitud\_dato=caudal);m^3/h;SI(Y(sistema\_de\_unidades=S.I.;Magnitud\_dato=velocidad);m/s;SI(Y(sistema\_de\_unidades=imperial;Magnitud\_dato=caudal);gpm;SI(Y(sistema\_de\_unidades=imperial;Magnitud\_dato=velocidad);pie/s))))$$

Por último los resultados que aparecen en la parte inferior de la hoja son simplemente las tablas y gráficas importadas de la hoja “Cálculos”.

## 7.2. Cálculo pérdidas

En la hoja “Cálculo pérdidas” se realiza el cálculo de las pérdidas de carga cuantificables. Para cada línea hay un bloque independiente donde se pueden introducir algunos datos como

el diámetro, el factor de fricción o la longitud de la línea. Estos datos solo afectan a la línea representada por ese bloque de tablas.

Línea 1

|                    |          |   |
|--------------------|----------|---|
| Longitud           | 1,484376 | m |
| Factor de fricción | 0,0151   | - |
| Diámetro           | 0,1524   | m |

| Accesorios          | I/D unitaria | Cantidad | I/D       |
|---------------------|--------------|----------|-----------|
| Tobera salida bomba | 33,11258278  | 1        | 33,112583 |
| Codo 90°            | 20           | 1        | 20        |
| Reductor 6" x 10"   | 26,49006623  | 1        | 26,490066 |
| -                   | 0            | 0        | 0         |
| -                   | 0            | 0        | 0         |
| -                   | 0            | 0        | 0         |
| -                   | 0            | 0        | 0         |
| -                   | 0            | 0        | 0         |
| -                   | 0            | 0        | 0         |
| -                   | 0            | 0        | 0         |
| -                   | 0            | 0        | 0         |
| Total               |              |          | 79,602649 |

Resultados línea

|                   |             |     |           |      |
|-------------------|-------------|-----|-----------|------|
| L total           | 13,61581971 | m   | 44,659889 | pies |
| ΔP <sub>100</sub> | 29,69781594 | mca | 12,727635 | psi  |
| h <sub>v</sub>    | 4,043601076 | mca | 5,7519219 | psi  |

|                   |           |                          |             |             |
|-------------------|-----------|--------------------------|-------------|-------------|
| Caudal            | 511,0306  | m³/h                     | 2250        | gpm         |
| Densidad          | 962,82    | Kg/m³                    | 59,98877932 | lb/pe³      |
| Viscosidad        | 0,000305  | Pa·s                     | 0,305       | centipoises |
| Diámetro interior | 0,1524    | m                        | 5,99988     | pulg        |
| Sección           | 0,0182415 | m²                       | 28,27422079 | pie²        |
| Velocidad real    | 7,781881  | m/s                      | 25,52456972 | pie/seg     |
| N° Reynolds       | 3743818,8 | >2000 RÉGIMEN TURBULENTO |             |             |

Fig. 7.2.1 Captura del bloque que conforma cada línea.

La primera tabla de color verde sirve para introducir los datos. La longitud únicamente puede ir en metros, mientras que el factor de fricción no tiene unidades y el diámetro cambia de unidades según se trabaje en S.I. o en Imperial. En caso de trabajar en imperial el valor del diámetro no cambia de forma automática si no que si se quiere mantener el valor se tiene que introducir el valor una vez aplicado el factor de conversión correspondiente.

La tabla roja de la derecha contiene una serie de magnitudes que sirven para realizar los cálculos internos. Algunas de estas magnitudes son datos que se han introducido mientras que otras se derivan de estos datos. Esta tabla no se puede modificar, ya que se alteraría el programa y daría unos resultados erróneos.

La tabla central es un listado de accesorios. Los accesorios se seleccionan mediante una lista desplegable, en la columna "Accesorios". En la columna "I/D unitaria" aparecen los valores asociados a cada accesorio. Esto es posible gracias a una función si anidada en la que si se cumple la condición de que esa celda es igual a un accesorio determinado se obtiene el valor de "I/D" asociado a ese accesorio. El signo "-" se utiliza para indicar que no hay más tipos diferentes de accesorios. La tabla se ha confeccionado con las filas necesarias para poder albergar todos los accesorios, pero en el caso de estudio esto no sucede en ninguna línea.

| Accesorios         | I/D unitaria | Cantidad | I/D       |
|--------------------|--------------|----------|-----------|
| Válvula retención  | 135          | 2        | 270       |
| Codo 90°           | 20           | 16       | 320       |
| Codo 45°           | 10           | 5        | 50        |
| Válvula compuerta  | 13           | 3        | 39        |
| Te paso recto      | 20           | 1        | 20        |
| Reducción 10" x 8" | 10,07194245  | 1        | 10,071942 |
| -                  | 0            | 0        | 0         |
| -                  | 0            | 0        | 0         |
| -                  | 0            | 0        | 0         |
| -                  | 0            | 0        | 0         |
| -                  | 0            | 0        | 0         |
| Total              |              |          | 709,07194 |

Fig. 8 Captura de la tabla de accesorios.

En la columna “Cantidad” se puede introducir el número de accesorios de ese tipo que hay en la línea, y por último en la columna “I/D” se obtiene el valor total de I/D considerando todos los accesorios del mismo tipo y al final de la tabla se realiza un total de I/D de la línea, para posteriormente ser multiplicado por el diámetro y obtener la longitud equivalente.

La ultima tabla del bloque es la tabla de resultados, donde aparece la longitud total, que es la suma de la longitud de la línea más la longitud equivalente, el  $\Delta P_{100}$  obtenido a partir de la fórmula mencionada en el apartado 6.2.1 y la  $lw$  de la línea. Estos resultados se presentan en S.I. y en el sistema anglosajón.

| Resultados línea |             |     |                |
|------------------|-------------|-----|----------------|
| L total          | 256,5742734 | m   | 841,56362 pies |
| $\Delta P_{100}$ | 2,125781466 | mca | 0,9110492 psi  |
| $lw$             | 5,454208349 | mca | 7,7584756 psi  |

Fig. 7.2.3 Captura de la tabla de resultados de la línea.

Este mismo sistema de tablas se repite para cada línea, obteniendo así una forma sencilla de introducir los datos necesarios.

Al final de la hoja “Cálculos pérdidas” se calcula el total de las pérdidas obtenidas en las siete líneas (dos en aspiración y cinco en impulsión), teniendo en cuenta únicamente las que han sido llamadas pérdidas de carga cuantificables. Las “pérdidas incógnita” aparecen indicadas al final de la hoja, pero no están incluidas en el cómputo total.

### 7.3. Curvas Bomba

Esta hoja está formada por dos tablas que contienen datos sobre la bomba. Hay una tabla de NPSH requerida y otra de funcionamiento de la bomba. Estas tablas se han construido a partir de una gráfica proporcionada, ya que es un dato que normalmente facilita el fabricante de la bomba.

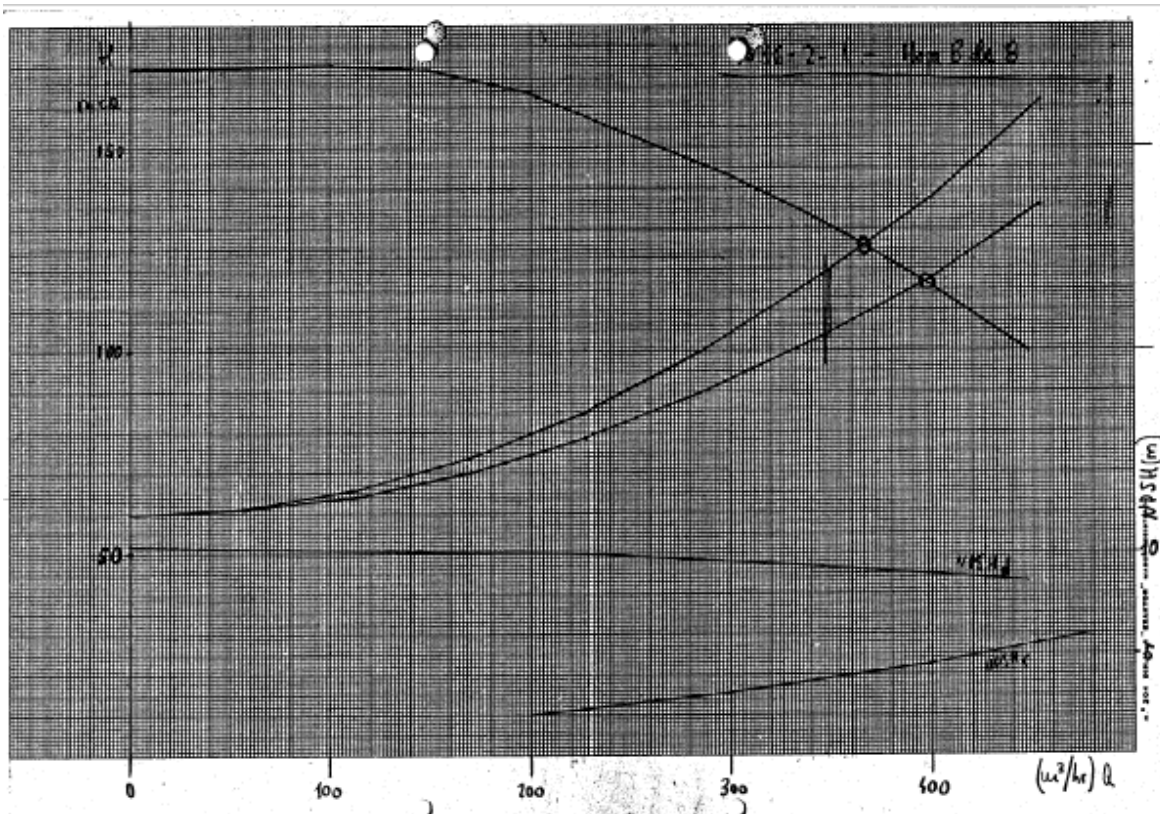


Fig. 9 Captura de la gráfica proporcionada en los cálculos originales.

A partir de los puntos de la gráfica se han confeccionado las tablas, en las que aparecen el caudal en los dos sistemas de unidades y en un caso la altura en metros de la NPSH y en el otro caso la altura en m.c.a.

| NPSHr (m) |                            |              | Funcionamiento Bomba |                            |              |
|-----------|----------------------------|--------------|----------------------|----------------------------|--------------|
| NPSHr (m) | Caudal (m <sup>3</sup> /h) | Caudal (gpm) | H (m.c.a.)           | Caudal (m <sup>3</sup> /h) | Caudal (gpm) |
| 2         | 200                        | 880,6        | 170                  | 0                          | 0            |
| 2,2       | 210                        | 924,63       | 170                  | 10                         | 44,03        |
| 2,3       | 220                        | 968,66       | 170                  | 20                         | 88,06        |
| 2,4       | 230                        | 1012,69      | 170                  | 30                         | 132,09       |
| 2,5       | 240                        | 1056,72      | 170                  | 40                         | 176,12       |
| 2,6       | 250                        | 1100,75      | 170                  | 50                         | 220,15       |
| 2,7       | 260                        | 1144,78      | 170                  | 60                         | 264,18       |
| 2,8       | 270                        | 1188,81      | 170                  | 70                         | 308,21       |
| 2,9       | 280                        | 1232,84      | 170                  | 80                         | 352,24       |
| 3         | 290                        | 1276,87      | 170                  | 90                         | 396,27       |
| 3,2       | 300                        | 1320,9       | 170                  | 100                        | 440,3        |
| 3,3       | 310                        | 1364,93      | 170                  | 110                        | 484,33       |
| 3,4       | 320                        | 1408,96      | 170                  | 120                        | 528,36       |
| 3,6       | 330                        | 1452,99      | 169,5                | 130                        | 572,39       |
| 3,7       | 340                        | 1497,02      | 169                  | 140                        | 616,42       |
| 3,8       | 350                        | 1541,05      | 168,5                | 150                        | 660,45       |
| 4         | 360                        | 1585,08      | 167,5                | 160                        | 704,48       |
| 4,2       | 370                        | 1629,11      | 166,5                | 170                        | 748,51       |
| 4,3       | 380                        | 1673,14      | 165,5                | 180                        | 792,54       |
| 4,4       | 390                        | 1717,17      | 164,5                | 190                        | 836,57       |
| 4,6       | 400                        | 1761,2       | 163,5                | 200                        | 880,6        |
| 4,7       | 410                        | 1805,23      | 161                  | 210                        | 924,63       |
| 4,9       | 420                        | 1849,26      | 159                  | 220                        | 968,66       |
| 5,1       | 430                        | 1893,29      | 157                  | 230                        | 1012,69      |
| 5,3       | 440                        | 1937,32      | 155                  | 240                        | 1056,72      |
| 5,5       | 450                        | 1981,35      | 153                  | 250                        | 1100,75      |
| 5,6       | 460                        | 2025,38      | 151                  | 260                        | 1144,78      |
| 5,8       | 470                        | 2069,41      | 149                  | 270                        | 1188,81      |

Fig. 10 Captura de las tablas de funcionamiento y NPSH de la bomba.

Como se puede ver la resolución es de 10 m<sup>3</sup>/h de caudal, con lo que se consigue bastante exactitud. A partir de estas tablas posteriormente se confecciona una gráfica en otra hoja del proyecto. Estas tablas pueden ser modificadas según las necesidades del usuario, y las indicaciones de cómo realizar los cambios aparecen en el capítulo 8 Instrucciones de uso.

## 7.4. Cálculos

En esta hoja se realizan los cálculos necesarios para la obtención de las curvas del sistema y los puntos de funcionamiento. Consta de dos partes, una se trata de una tabla y las curvas de modelización, donde se llevan a cabo los diferentes cálculos, mientras que en la otra parte están las gráficas construidas a partir de las diferentes tablas y las tablas de cálculo del punto de funcionamiento.



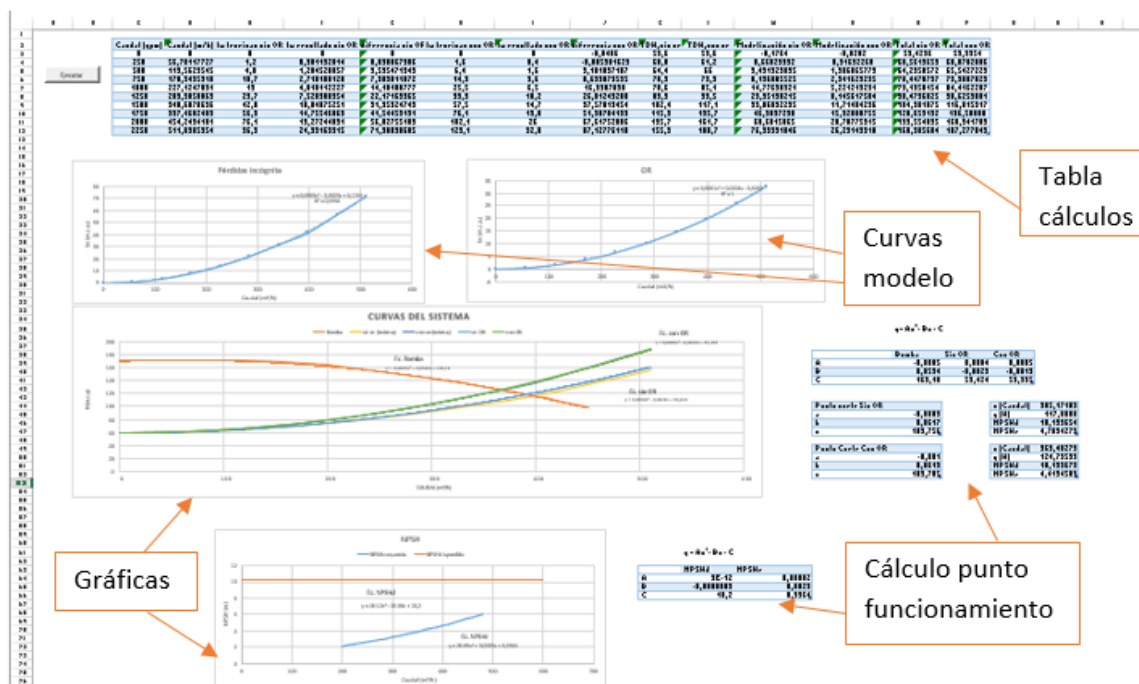


Fig. 11 Vista general de la hoja "Cálculos"

### 7.4.1. Tabla Cálculos

En la confección de esta tabla es donde aparece el uso de la macro. Es una tabla donde hay una serie de caudales (de 0 a 2250 gpm con un incremento de 250) para los que se van obteniendo distintos valores que se van detallando a continuación.

| Caudal (gpm) | Caudal (m/h) | lw teoricas sin OR | lw resultado sin OR | diferencia sin OR |
|--------------|--------------|--------------------|---------------------|-------------------|
| 0            | 0            | 0                  | 0                   | 0                 |
| 250          | 56,78117727  | 1,2                | 0,301132014         | 0,898867986       |
| 500          | 113,5623545  | 4,8                | 1,204528057         | 3,595471943       |
| 750          | 170,3435318  | 10,7               | 2,710188128         | 7,989811872       |
| 1000         | 227,1247091  | 19                 | 4,818112227         | 14,18188777       |
| 1250         | 283,9058863  | 29,7               | 7,528300354         | 22,17169965       |
| 1500         | 340,6870636  | 42,8               | 10,84075251         | 31,95924749       |
| 1750         | 397,4682409  | 56,3               | 14,75546869         | 41,54453131       |
| 2000         | 454,2494181  | 76,1               | 19,27244891         | 56,82755109       |
| 2250         | 511,0305954  | 96,3               | 24,39169315         | 71,90830685       |

Fig. 12 Captura de la primera parte de la tabla de cálculos.

En la primera parte de la tabla aparecen los caudales en ambos sistemas de unidades, ocupando las dos primeras columnas. En la tercera columna llamada "lw teóricas sin OR" aparecen los valores obtenidos de la tabla que aparece en los cálculos en los que se basa el proyecto, es decir, los que se dan por valores reales. En la cuarta columna "lw resultado sin

OR” aparecen los valores obtenidos por la herramienta en la hoja “Cálculos pérdidas”, donde no se consideran las pérdidas de carga que no dependen del caudal.

La macro se utiliza en esta columna, y la operación que realiza es un “copiar” del valor del caudal en  $\text{m}^3/\text{h}$ , un pegar en la hoja “Datos y resultados” en la casilla correspondiente al valor del caudal, con lo que el programa calcula las pérdidas para ese caudal. Un “copiar” de las pérdidas totales en m.c.a. en la hoja “Cálculos pérdidas” y por último un “pegar” en la celda de la tabla anterior correspondiente a la “lw resultado sin OR” para ese caudal. Esta operación se repite para todos los caudales, obteniendo así los diferentes valores de las pérdidas de carga para cada caudal. Todo esto con la opción “Caudal” en la celda de “Magnitud dato”.

|                                     |             |     |           |     |
|-------------------------------------|-------------|-----|-----------|-----|
| Pérdida total aspiración y descarga | 24,39169315 | mca | 34,696576 | psi |
|-------------------------------------|-------------|-----|-----------|-----|

Fig. 13 Captura de la selección del valor de las pérdidas de carga.

Para crear esta macro seleccionar en el menú principal “Desarrollador”→ “Grabar macro”.

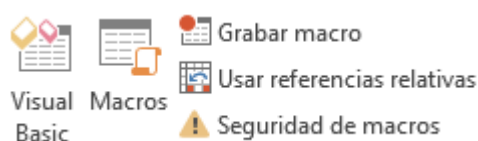


Fig. 14 Captura del menú de las macros.

A continuación aparece la siguiente ventana:

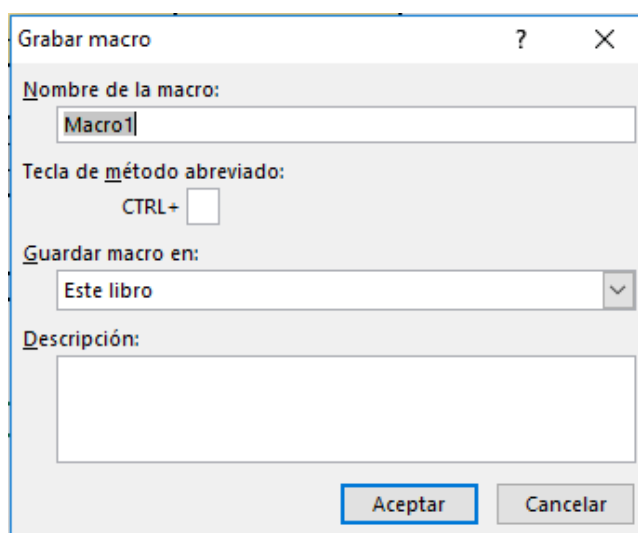


Fig. 7.4.5 Captura de la ventana “Grabar macro”.



Donde se debe introducir el nombre y crear la macro. La macro que utiliza esta herramienta tiene por nombre “Ejecutar”.

La macro empieza a grabar, memorizando todas las acciones, y una vez que se han realizado todas las operaciones deseadas se hace “click” en “Detener macro”. Para poder ejecutarla se añade un botón que al hacer “click” sobre él se reproducen automáticamente todas las operaciones que habían sido grabadas.

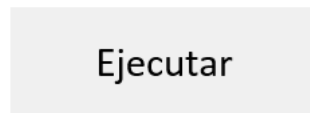


Fig. 7.4.6 Captura del botón “Ejecutar”

Para asignar la macro al botón simplemente hace falta hacer “click” con el botón derecho del ratón sobre el botón de ejecutar, abriendo un menú en el que aparece “Asignar macro”.

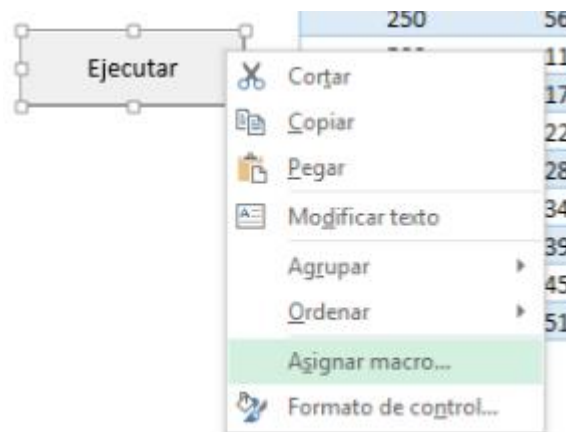


Fig. 15 Captura de la asignación de macro al botón.

Seleccionando esta opción se abre una ventana donde se escoge el nombre de la macro creada y automáticamente se la asigna al botón al aceptar.

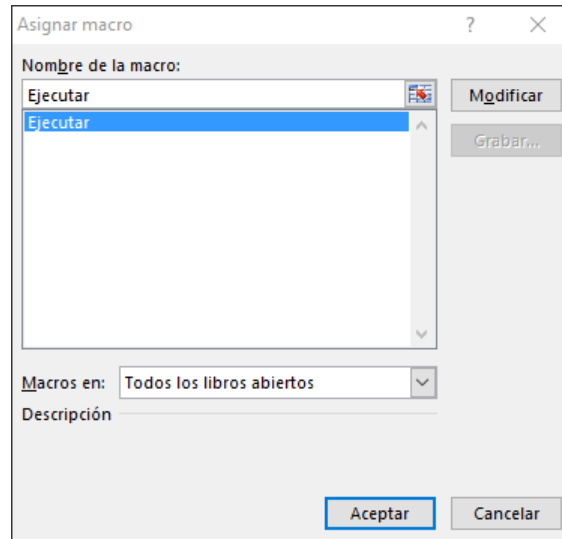


Fig. 7.4.8 Captura de la ventana de selección de la macro asignada al botón.

En la quinta columna llamada “diferencia sin OR” aparece la diferencia entre los valores teóricos reales obtenidos de la tabla que aparece en la figura 6.2.2 y los valores que figuran en la columna “lw resultado sin OR”. Con esto se consigue tener una aproximación el valor conjunto de las “pérdidas incógnita”, para obtener una gráfica de “pérdidas incógnita” en función del caudal como la siguiente:

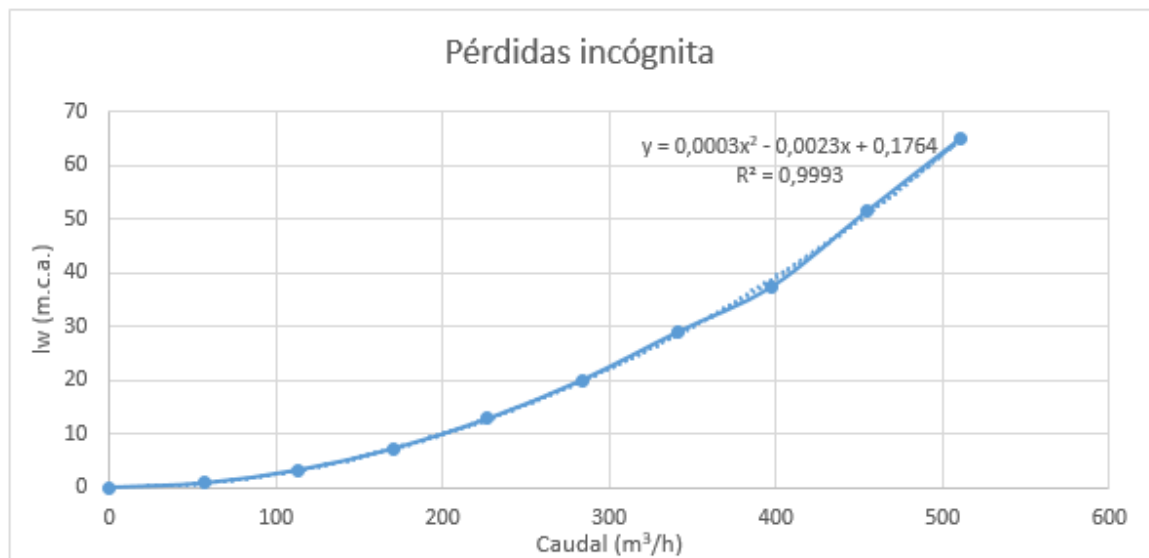


Fig. 16 Gráfica de las “pérdidas incógnita” con ecuación.

Buscando la línea de tendencia, mediante una función polinómica de segundo orden se obtiene una expresión matemática que relaciona el valor de estas pérdidas con el caudal. Posteriormente esta expresión servirá para modelizar las “pérdidas incógnita” y obtener así una aproximación de su valor real.

La segunda parte de la tabla está comprendida por cuatro columnas. En la primera de ellas, “lw teóricas con OR”, aparecen los valores proporcionados en los cálculos de partida del proyecto para las pérdidas de carga con OR. En la segunda columna llamada “OR”, se obtiene un valor a partir de la resta de las dos pérdidas teóricas, las pérdidas con OR menos las pérdidas sin OR, consiguiendo así el valor real del OR para cada caudal.

| lw teóricas con OR | OR   | TDH <sub>s</sub> sin or | TDH <sub>s</sub> con or |
|--------------------|------|-------------------------|-------------------------|
| 0                  | 0    | 59,6                    | 59,6                    |
| 1,6                | 0,4  | 60,8                    | 61,2                    |
| 6,4                | 1,6  | 64,4                    | 66                      |
| 14,3               | 3,6  | 70,3                    | 73,9                    |
| 25,5               | 6,5  | 78,6                    | 85,1                    |
| 39,9               | 10,2 | 89,3                    | 99,5                    |
| 57,5               | 14,7 | 102,4                   | 117,1                   |
| 76,1               | 19,8 | 115,9                   | 135,7                   |
| 102,1              | 26   | 135,7                   | 161,7                   |
| 129,1              | 32,8 | 155,9                   | 188,7                   |

Fig. 7.4.10 Captura de la segunda parte de la tabla de cálculos.

A partir de estos valores y como se había hecho con la curva de “pérdidas incógnita” se confecciona una gráfica que relaciona las pérdidas exclusivas del OR con el caudal.

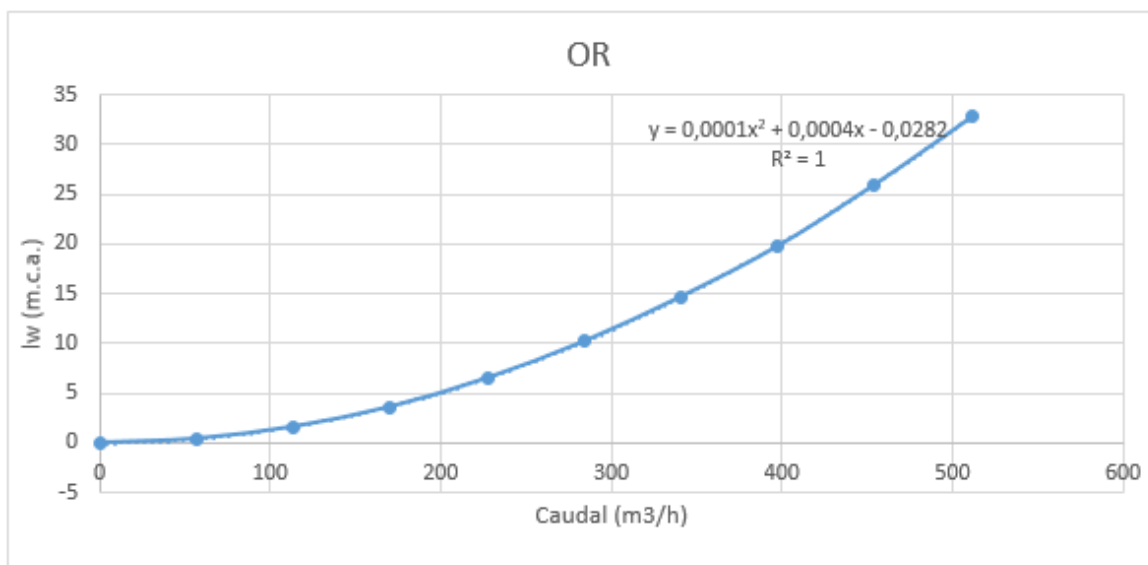


Fig. 7.4.11 Gráfica del OR con ecuación.

Como se ha hecho también con la gráfica de “pérdidas incógnita” se obtiene una ecuación con tal de modelizar estas caídas de presión.

Las dos siguientes columnas simplemente contienen los valores proporcionados de TDHr, es decir, de la suma de las pérdidas teóricas más la altura de 59,6 metros. Estas columnas simplemente sirven como referencia para después poder comparar los resultados de nuestro

caso de estudio a simple vista.

| Modelización sin OR | Modelización con OR | Total sin OR | Total con OR | Error sin OR | Error con OR |
|---------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0,1764              | -0,0282             | 59,7764      | 59,7482      | 0,295973154  | 0,248657718  |
| 1,01303392          | 0,31692268          | 60,91416593  | 61,23108861  | 0,187772918  | 0,050798389  |
| 3,784129095         | 1,306865779         | 64,58865715  | 65,89552293  | 0,292945887  | -0,158298591 |
| 8,489685525         | 2,941629295         | 70,79987365  | 73,74150295  | 0,711057827  | -0,214475037 |
| 15,12970321         | 5,221213231         | 79,54781544  | 84,76902867  | 1,205872057  | -0,388920485 |
| 23,70418215         | 8,145617584         | 90,8324825   | 98,97810009  | 1,716105828  | -0,524522524 |
| 34,21312235         | 11,71484236         | 104,6538749  | 116,3687172  | 2,201049664  | -0,624494269 |
| 46,6565238          | 15,92888755         | 121,0119925  | 136,94088    | 4,410692399  | 0,914428914  |
| 61,0343865          | 20,78775315         | 139,9068354  | 160,6945886  | 3,100099785  | -0,62177578  |
| 77,34671046         | 26,29143918         | 161,3384036  | 187,6298428  | 3,488392309  | -0,567120937 |

Fig. 7.4.12 Captura de la tercera parte de la tabla de cálculos.

La última parte de la tabla está formada por las seis columnas restantes. En las dos primeras columnas de esta tabla, “Modelización sin OR” y “Modelización con OR” es donde intervienen las curvas de modelización que se han obtenido anteriormente. Manualmente se introduce la expresión obtenida en las gráficas y la incógnita independiente toma el valor del caudal, consiguiendo así unas “pérdidas incógnita” y un OR para cada caudal. La expresión introducida tendría la siguiente forma:

$$= 0,0003 * 'Caudal (S.I)'^2 - 0,0023 * 'Caudal (S.I)' + 0,1764$$

Por tanto, cada vez que se realice una modificación del sistema si se aprecia que la expresión de la curva de “pérdidas incógnita” se ha modificado, los nuevos coeficientes de esta tendrían que substituir a los actuales introduciéndolos manualmente en la expresión. En el caso de la OR la expresión no variará, ya que solo depende de los datos teóricos.

La columna “Total sin OR” contiene la suma de la columna “lw resultado sin OR”, la altura estática o también llamada del sistema y de la columna “Modelización sin OR”. Esta columna contiene el resultado final de TDH sin OR obtenido por el programa, y que posteriormente se utiliza para la confección de la gráfica que contiene las curvas del sistema.

La columna “Total con OR” contiene la suma de las columnas “Total sin OR” y “Modelización con OR”. El contenido es el resultado final de TDH considerando OR.

Por último en las dos últimas columnas se ha calculado el porcentaje de error relativo, para hacer una comprobación de que los resultados se adecuan a los valores reales. Este error solo es válido para nuestro caso de estudio, ya que en otro caso los datos reales no coincidirán con los representados en la tabla.

### 7.4.2. Gráficas

Esta hoja incluye dos gráficas de resultados, la que contiene las curvas del sistema y la que contiene las curvas de NPSH.

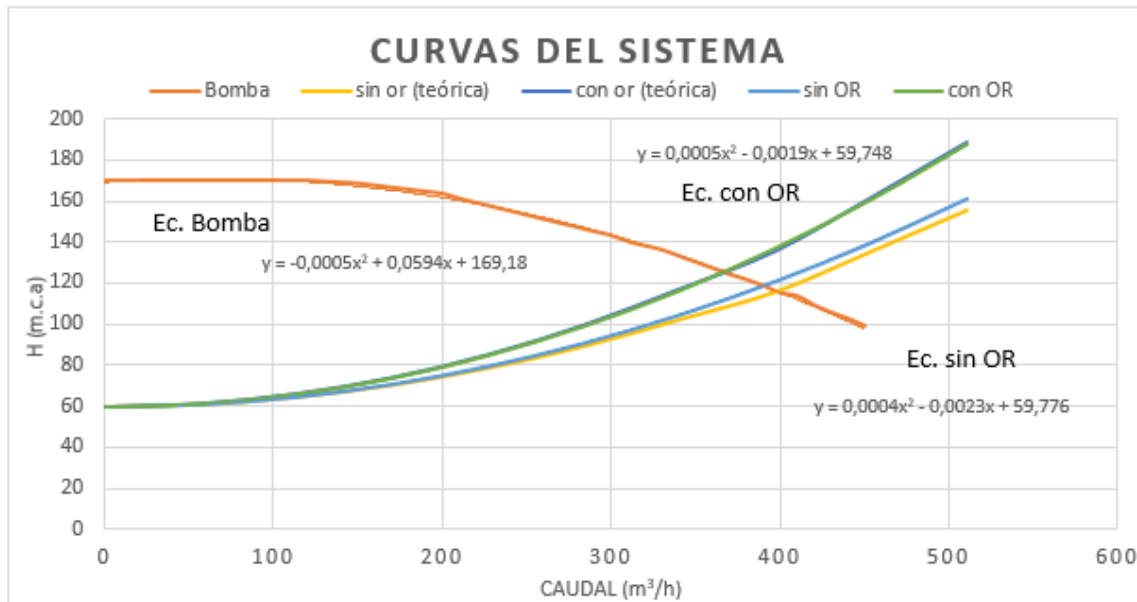


Fig. 17 Gráfica con curvas del sistema (resultado y teóricas) y de la bomba con ecuaciones.

En la gráfica de curvas del sistema se han incluido la curva de la bomba introducida en “Curvas bomba”, las dos curvas obtenidas con los valores teóricos y las dos curvas obtenidas mediante los resultados del programa. Se han incluido estas últimas cuatro curvas para comparar las teóricas con las obtenidas como resultado entre ellas, y ver gráficamente si son similares.

También se obtienen las expresiones de las curvas, ya que mas adelante servirán para encontrar los puntos de corte.

La gráfica de NPSH contiene las curvas de NPSH disponible obtenida de la hoja oculta “NPSHd” y la NPSH requerida que se obtiene de la hoja “Curvas bomba”.

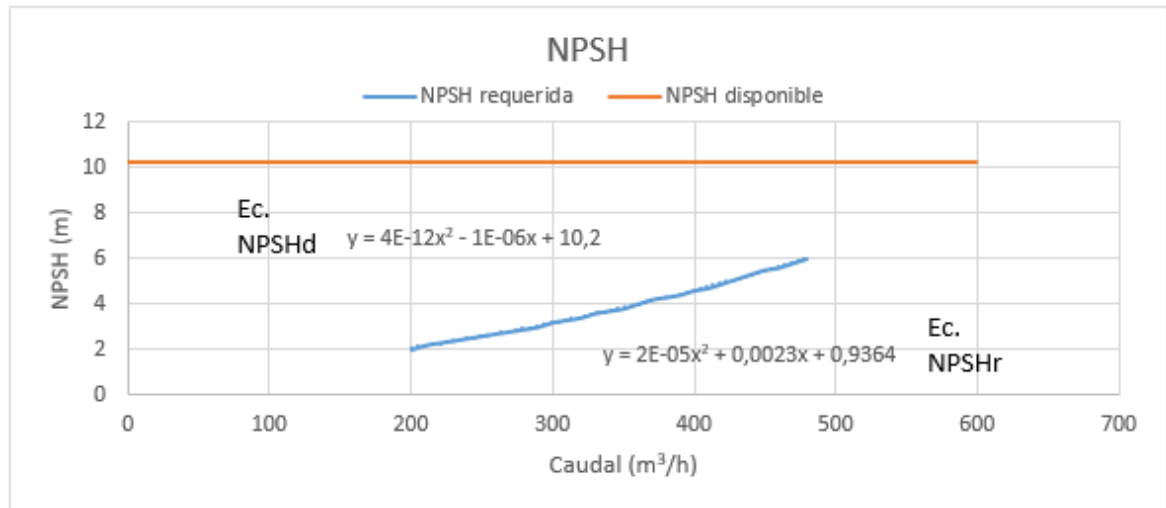


Fig. 7.4.14 Gráfica de las NPSH con ecuaciones.

En este caso también se obtienen las expresiones matemáticas, ya que serán de utilidad una vez encontrado el punto de funcionamiento para ver la NPSH disponible y requerida que hay en dicho punto.

### 7.4.3. Puntos de funcionamiento

Esta parte de la hoja consta de una serie de tablas divididas en dos bloques, las tablas de cálculo de punto de funcionamiento y las de NPSH para el punto de funcionamiento.

Las tablas para el cálculo del punto de funcionamiento son cinco. En la superior se introducen los coeficientes de las expresiones obtenidas en la gráfica de curvas del sistema de forma manual. Es importante fijarse si los valores de estos coeficientes han cambiado y en ese caso substituirlos manualmente, ya que sino los puntos de funcionamiento no serán los correctos, En el capítulo 8 Instrucciones de uso se indica cómo realizar esta operación.

$$y = Ax^2 + Bx + C$$

|   | Bomba   | Sin OR  | Con OR  |
|---|---------|---------|---------|
| A | -0,0005 | 0,0004  | 0,0005  |
| B | 0,0594  | -0,0023 | -0,0019 |
| C | 169,18  | 59,776  | 59,748  |

| Punto corte Sin OR |         |
|--------------------|---------|
| a                  | -0,0009 |
| b                  | 0,0617  |
| c                  | 109,404 |

|            |            |
|------------|------------|
| x (Caudal) | 384,613283 |
| y (H)      | 118,06234  |
| NPSHd      | 10,193616  |
| NPSHr      | 4,7795581  |

| Punto Corte Con OR |         |
|--------------------|---------|
| a                  | -0,001  |
| b                  | 0,0613  |
| c                  | 109,432 |

|            |            |
|------------|------------|
| x (Caudal) | 362,871948 |
| y (H)      | 124,896568 |
| NPSHd      | 10,1996377 |
| NPSHr      | 4,40452649 |

Fig. 7.4.15 Captura de las tablas de cálculo del punto de funcionamiento.

Para resolver el sistema se realiza un sistema de ecuaciones de segundo grado.

$$y = A_1 \cdot x^2 + B_1 \cdot x + C_1$$

$$y = A_2 \cdot x^2 + B_2 \cdot x + C_2$$

Se igualan las ecuaciones y se obtiene la siguiente expresión:

$$A_1 \cdot x^2 + B_1 \cdot x + C_1 = A_2 \cdot x^2 + B_2 \cdot x + C_2$$

$$(A_1 - A_2) \cdot x^2 + (B_1 - B_2) \cdot x + (C_1 - C_2) = 0$$

$$a \cdot x^2 + b \cdot x + c = 0$$

Donde:

$$a = (A_1 - A_2)$$

$$b = (B_1 - B_2)$$

$$c = (C_1 - C_2)$$

Estas acciones son las que dan pie a las dos tablas llamadas “Punto Corte Sin OR” y “Punto Corte Con OR”, ya que estas contienen los valores de los coeficientes restados.

Para encontrar la solución se aplica la fórmula:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2a} \quad \text{Ecuación 7.4.1}$$

De la fórmula anterior se obtienen dos resultados uno positivo y uno negativo. El negativo se ignora ya que no tiene sentido físico y el resultado positivo es el valor del caudal para ese punto de funcionamiento. La y o altura (H) se obtiene sustituyendo la x en la función de la bomba.

Por último el segundo bloque de tablas, que en realidad está formado por una única tabla destinada a encontrar las NPSH del punto de corte o de funcionamiento.

$$y = Ax^2 + Bx + C$$

|   | NPSH <sub>d</sub> | NPSH <sub>r</sub> |
|---|-------------------|-------------------|
| A | 4E-12             | 0,00002           |
| B | -0,000001         | 0,0023            |
| C | 10,2              | 0,9364            |

Fig. 7.4.16 Captura de la tabla para calcular valores de NPSH del punto de funcionamiento.

Funciona de forma similar, ya que los coeficientes de las curvas tienen que ser introducidos manualmente en la tabla que se muestra en la figura 7.4.16. Una vez introducidos se calcula el valor de las NPSH substituyendo el caudal del punto de funcionamiento en las expresiones obtenidas, hallando así en valor exacto de la NPSH para este punto en metros

## 7.5. Hojas ocultas

En la herramienta hay dos hojas ocultas, ya que solo sirven como hojas intermediarias. Una se llama “Accesorios” y como se ha comentado anteriormente, contiene todos los elementos que aparecen en las listas desplegables.

| Accesorios          | I/D unitaria |
|---------------------|--------------|
| Salida sumidero     | 0,78         |
| Codo 90°            | 20           |
| Codo 45°            | 10           |
| Válvula compuerta   | 13           |
| Reducción 10' x 8'  | 0,14         |
| Reductor 6' x 10'   | 0,4          |
| Tobera salida bomba | 0,5          |
| Te paso recto       | 20           |
| Te paso perforado   | 60           |
| Válvula retención   | 135          |
| -                   | 0            |

|          |
|----------|
| S.I.     |
| Imperial |

|           |
|-----------|
| Caudal    |
| Velocidad |

|                   |                     |
|-------------------|---------------------|
| m <sup>3</sup> /h | gpm                 |
| Kg/m <sup>3</sup> | lb/pie <sup>3</sup> |
| Pa·s              | centipoises         |
| m                 | pulg                |
| m/s               | pie/seg             |

Fig. 18 Vista general de la hoja “Accesorios”.

La segunda hoja oculta se llama “NPSH<sub>d</sub>” y es la hoja donde se llevan a cabo los cálculos para obtener la NPSH disponible. Hay una tabla donde para unos caudales determinados (de 0 a 600 m<sup>3</sup>/h con un incremento de 5 m<sup>3</sup>/h) aparecen las pérdidas en la aspiración asociadas a ese caudal y la NPSH<sub>d</sub> calculada con la fórmula del apartado 6.3. A partir de esta tabla se gráfica la curva de NPSH<sub>d</sub> en la hoja “Cálculos”.





## 8. Instrucciones de uso

### 8.1. Introducción de datos

1. En la primera hoja llamada 'Datos y resultados' se dan a escoger el sistema de unidades y la magnitud dato que se quiere utilizar. Mediante una pestaña se selecciona cada uno de estos ítems. En la celda asignada al sistema de unidades (E4) se puede escoger entre 'S.I.' o 'Imperial' según en qué unidades se deseen introducir los datos. Por otra parte para seleccionar la magnitud dato (celda E5) se puede elegir entre 'Caudal' o 'Velocidad'.

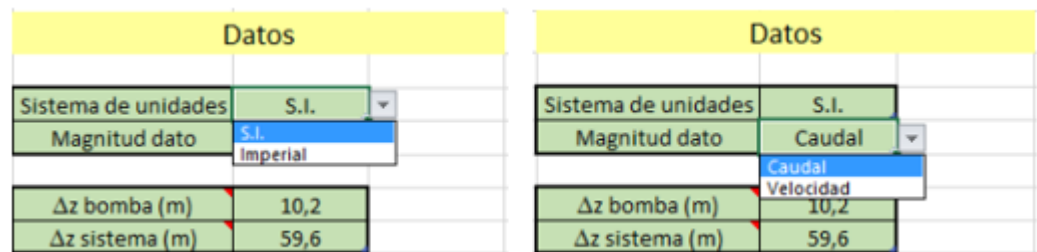


Fig. 20 Captura pestañas de selección de datos.

2. En la primera hoja llamada 'Datos y resultados' se introducen los siguientes datos:
  - $\Delta z$  de la bomba: Diferencia de cotas entre el desagüe del sumidero y la entrada de la bomba en metros.
  - $\Delta z$  del sistema: Diferencia de cotas entre el desagüe del sumidero y el punto más alto del sistema (toberas de rociado) en metros.
  - Caudal o velocidad: Caudal o velocidad en las unidades correspondientes. Valor predeterminado Caudal en S.I.
  - Densidad: Densidad del refrigerante. Valor predeterminado para agua en unidades del S.I.
  - Viscosidad: Viscosidad del refrigerante. Valor predeterminado para agua en unidades del S.I.

|                        |      |  |                        |      |  |
|------------------------|------|--|------------------------|------|--|
| $\Delta z$ bomba (m)   | 10,2 |  | $\Delta z$ bomba (m)   | 10,2 |  |
| $\Delta z$ sistema (m) | 59,6 |  | $\Delta z$ sistema (m) | 59,6 |  |

|            |             |                   |            |             |                   |
|------------|-------------|-------------------|------------|-------------|-------------------|
| Caudal     | 511,0305954 | m <sup>3</sup> /h | Velocidad  | 511,0305954 | m/s               |
| Densidad   | 962,82      | Kg/m <sup>3</sup> | Densidad   | 962,82      | Kg/m <sup>3</sup> |
| Viscosidad | 0,000305    | Pa·s              | Viscosidad | 0,000305    | Pa·s              |

Fig. 8.1.2 Captura de las tablas de introducción de datos.

Es importante ser coherente con el sistema de unidades escogido, ya que en caso contrario los resultados obtenidos serán incorrectos. Todas las celdas asociadas a los datos anteriores deben contener un valor numérico.

3. En la segunda hoja llamada 'Cálculos pérdidas' hay una serie de datos que pueden ser modificados de forma independiente en cada línea:
  - Diámetro de la tubería
    - En caso de introducir los datos en el sistema imperial o anglosajón es necesario convertir el dato del diámetro en cada línea (en las 2 de la aspiración y en las 5 de la descarga), ya que el valor preestablecido se encuentra en unidades del S.I. y este no cambia de forma automática.
  - Longitud de la línea
  - Factor de fricción

|                    |       |   |
|--------------------|-------|---|
| Longitud           | 9     | m |
| Factor de fricción | 0,017 | - |
| Diámetro           | 0,102 | m |

*Tabla 21 Datos modificables en la hoja "cálculos pérdidas".*

Los datos preestablecidos son los actuales de la central. Sólo se deben modificar estos datos en caso de una modificación del sistema que afecte a alguno de estos. Es importante no modificar las otras celdas, únicamente pueden ser modificadas las que se encuentren en el interior de celdas de color verde (ver figura 8.1.1) y en el caso del diámetro siendo consecuente con el sistema de unidades escogido. La longitud de la línea siempre se debe introducir en metros.

4. En caso de querer modificar algún aspecto relacionado con los accesorios se debe hacer aparecer la hoja de accesorios que normalmente esta oculta. Haciendo "click" con el botón derecho sobre alguna de las pestañas visibles se abre un desplegable.

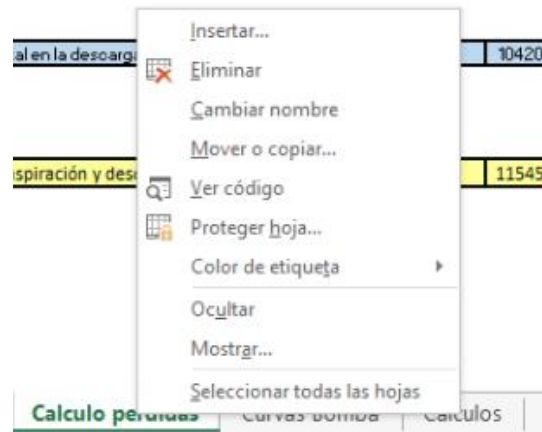


Fig. 22 Captura del menú para mostrar hojas de cálculo ocultas.

A continuación se selecciona “Mostrar” y se abre una ventana con las pestañas ocultas. Haciendo “click” sobre “Accesorios” aparece en la hoja de cálculo una pestaña llamada “Accesorios”.

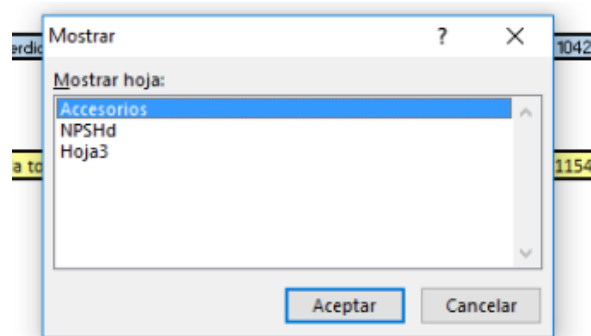


Fig. 23 Captura de la ventana para mostrar hojas de cálculo ocultas.

|     |   |                     |              |   |          |             |           |
|-----|---|---------------------|--------------|---|----------|-------------|-----------|
| E18 |   |                     |              |   |          |             |           |
|     | A | B                   | C            | D | E        | F           | G         |
| 1   |   |                     |              |   |          |             |           |
| 2   |   | Accesorios          | I/D unitaria |   | S.I.     |             | Caudal    |
| 3   |   | Salida sumidero     | 0,78         |   | Imperial |             | Velocidad |
| 4   |   | Codo 90°            | 20           |   |          |             |           |
| 5   |   | Codo 45°            | 10           |   |          |             |           |
| 6   |   | Válvula compuerta   | 13           |   | m³/h     | gpm         |           |
| 7   |   | Reducción 10' x 8'  | 0,14         |   | Kg/m³    | lb/pie³     |           |
| 8   |   | Reductor 6' x 10'   | 0,4          |   | Pa·s     | centipoises |           |
| 9   |   | Tobera salida bomba | 0,5          |   | m        | pulg        |           |
| 10  |   | Te paso recto       | 20           |   | m/s      | pie/seg     |           |
| 11  |   | Te paso perforado   | 60           |   |          |             |           |
| 12  |   | Válvula retención   | 135          |   |          |             |           |
| 13  |   | -                   | 0            |   |          |             |           |
| 14  |   |                     |              |   |          |             |           |
| 15  |   |                     |              |   |          |             |           |
| 16  |   |                     |              |   |          |             |           |
| 17  |   |                     |              |   |          |             |           |
| 18  |   |                     |              |   |          |             |           |
| 19  |   |                     |              |   |          |             |           |
| 20  |   |                     |              |   |          |             |           |
| 21  |   |                     |              |   |          |             |           |
| 22  |   |                     |              |   |          |             |           |

Fig. 24 Captura de la hoja de cálculo "Accesorios".

- Para cambiar el valor de la I/D de los accesorios simplemente introducir el nuevo valor.
- Si se desea añadir nuevos accesorios, se complica un poco, ya que hay que tener un control suficiente del programa para añadir funciones condicionales anidadas como se ha explicado en el punto anterior.

En todo caso se podría añadir una nueva fila a continuación de la tabla de accesorios ya existente. A continuación en la hoja de "Cálculo pérdidas" se tendría que modificar la función que permite el funcionamiento del sistema de cálculo de pérdidas. Esta función está en la columna asociada a I/D unitaria y se trata de una función SI. Para añadir un accesorio hay que añadir en el final de la función las condiciones para que se tenga en cuenta el nuevo valor del accesorio que se desea introducir de la misma forma que se ha hecho con los accesorios que ya están introducidos.

| Accesorios        | I/D unitaria | Cantidad | I/D       |
|-------------------|--------------|----------|-----------|
| Salida sumidero   | 56,11510791  | 1        | 56,115108 |
| Válvula compuerta | 13           | 1        | 13        |
| Te paso recto     | 20           | 1        | 20        |
| Codo 90°          | 20           | 7        | 140       |
| -                 | 0            | 0        | 0         |
| -                 | 0            | 0        | 0         |
| -                 | 0            | 0        | 0         |
| -                 | 0            | 0        | 0         |
| -                 | 0            | 0        | 0         |
| -                 | 0            | 0        | 0         |
| -                 | 0            | 0        | 0         |
| Total             |              |          | 229,11511 |

Fig. 25 Captura de la tabla de accesorios de cada línea.

Para actualizar los elementos del desplegable de la columna accesorios con tal de que aparezca el nuevo accesorio, es necesario seleccionar la primera celda de la columna (en la imagen anterior la que pone “Salida sumidero”) y a continuación en el menú principal seleccionar “DATOS” → “Validación de datos...”

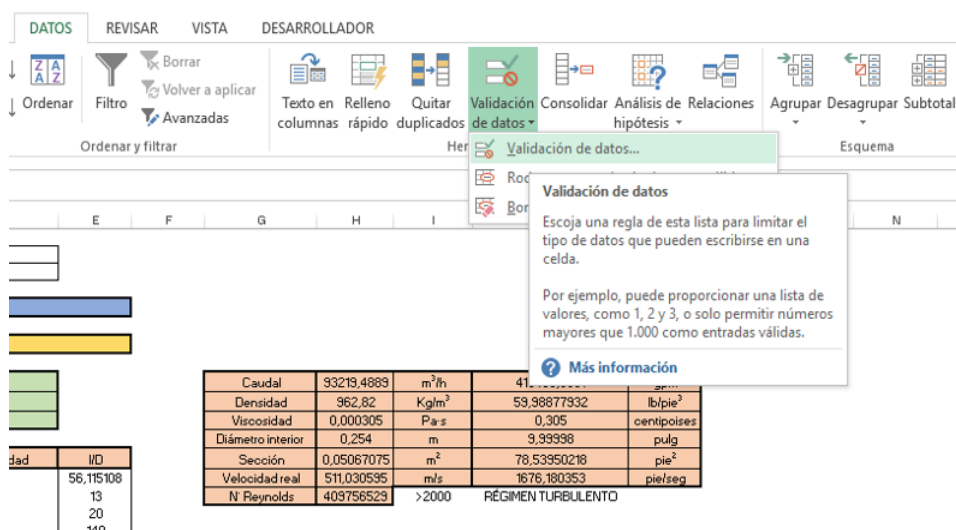


Fig. 26 Captura del menú para crear menús desplegables.

Se abrirá una nueva ventana como la siguiente:

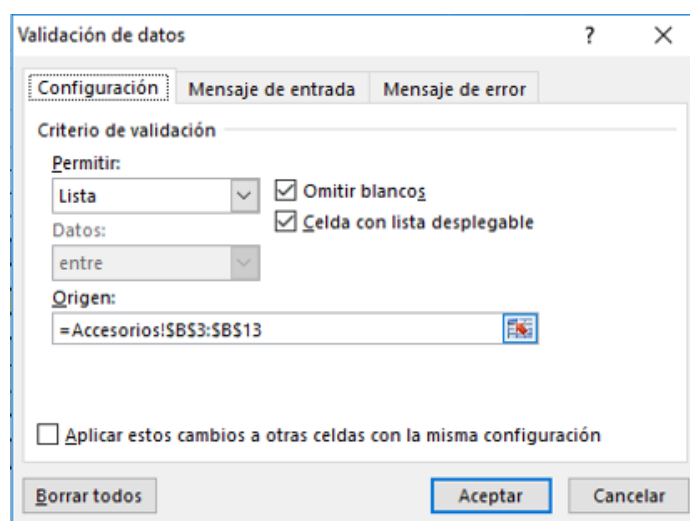


Fig. 27 Captura de la ventana para crear menús desplegables.

Nos aparece la opción “Lista” en “Permitir”, en caso de no aparezca quiere decir que no está bien seleccionada la casilla de la columna “Accesorios” de la hoja “Cálculo pérdidas”. En el campo origen hacer “click” en el botón que se encuentra a la derecha del campo, y que sirve para seleccionar los elementos que aparecen en el desplegable. Esto conduce directamente a la página de “Accesorios” donde tendremos que seleccionarlos todos de la siguiente manera:

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a table of accessories. The table has two columns: 'Accesorios' (Accessories) and 'I/D unitaria' (Unitary I/D). The table is located in the range B3:B14. A data validation dialog box is open over the table, showing the range \$B\$3:\$B\$14. The dialog box has a title 'Validación de datos' and a formula bar containing '=Accesorios:\$B\$3:\$B\$14'.

|    | A | B                   | C            | D | E |
|----|---|---------------------|--------------|---|---|
| 1  |   |                     |              |   |   |
| 2  |   | Accesorios          | I/D unitaria |   |   |
| 3  |   | Salida sumidero     | 0,78         |   |   |
| 4  |   | Codo 90°            | 20           |   |   |
| 5  |   | Codo 45°            | 10           |   |   |
| 6  |   | Válvula compuerta   | 13           |   |   |
| 7  |   | Reducción 10' x 8'  | 0,14         |   |   |
| 8  |   | Reductor 6' x 10'   | 0,4          |   |   |
| 9  |   | Tobera salida bomba | 0,5          |   |   |
| 10 |   | Te paso recto       | 20           |   |   |
| 11 |   | Te paso perforado   | 60           |   |   |
| 12 |   | Válvula retención   | 135          |   |   |
| 13 |   | -                   | 0            |   |   |
| 14 |   | Nuevo accesorio     | x            |   |   |

Fig. 28 Captura del proceso para añadir un nuevo accesorio a un menú desplegable.

A continuación pulsar la tecla “ENTER” y seleccionar “Aceptar” en la ventana de validación de datos. Para acabar en la tabla de la hoja “Cálculos pérdidas” es necesario arrastrar el valor introducido en la primera celda de la tabla de accesorios.

5. Modificaciones en las curvas de funcionamiento y NPSH de la bomba. Para modificar estos valores simplemente poner el nuevo valor sobre asociado a un caudal determinado sobre el antiguo. En caso de ampliar el número de datos, para que estos se representaran en las gráficas es necesario modificarla de la siguiente forma:

Con el botón derecho del ratón hacer “click” sobre la gráfica curvas del sistema de la hoja “Cálculos” y aparece un menú donde se debe seleccionar “Seleccionar datos...”



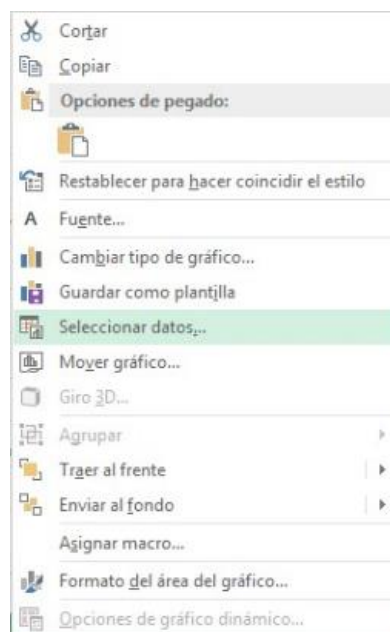


Fig. 29 Captura del menú para seleccionar datos de una gráfica.

A continuación se selecciona la opción “Bomba” y se hace “click” en “Modificar”

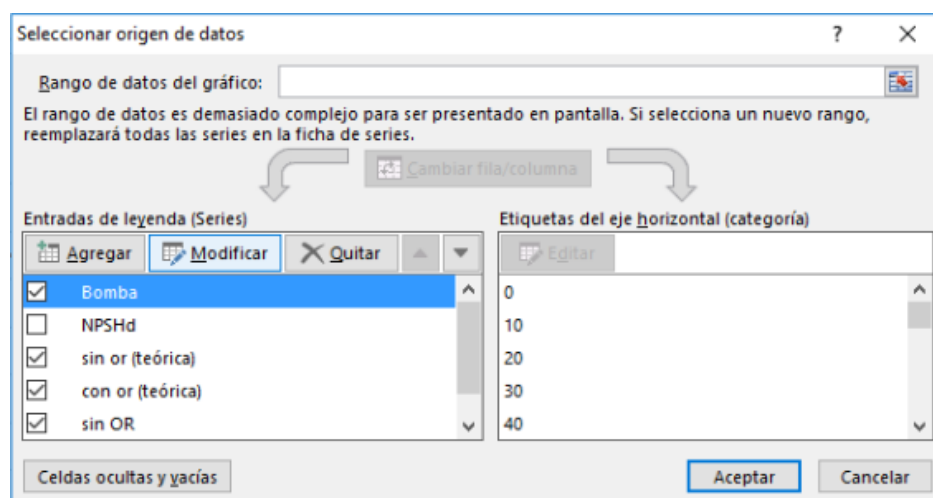


Fig. 30 Captura de la ventana para seleccionar datos de una gráfica.

Para acabar seleccionar los nuevos valores X e Y de la serie y “Aceptar” para finalizar.

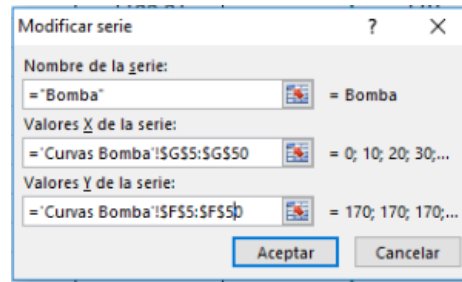


Fig. 31 Captura de la selección de celdas para incluirlas en una gráfica.

## 8.2. Obtención de curvas y puntos de funcionamiento

En caso de modificar algún parámetro estructural, que cambie el diseño del sistema se tienen que recalcular todas las curvas del sistema. Para ello hará falta ejecutar el programa y a continuación seguir el procedimiento para encontrar los puntos de funcionamiento. Como ya se ha explicado anteriormente para obtener estos puntos basta con encontrar la intersección de las curvas de la bomba y las del sistema. Sin embargo el Software no es capaz de hacerlo por si solo por tanto se ha preparado para que pueda realizarse de la siguiente forma:

1. En la primera página “Datos y resultados” escoger la opción “Caudal” en el apartado “Magnitud dato”. En caso de que el dato fuese opción “Velocidad” no es necesario cambiar el valor asociado a la velocidad (celda E10), ya que la hoja está programada para ir asignando una serie de valores predeterminados a esta celda.

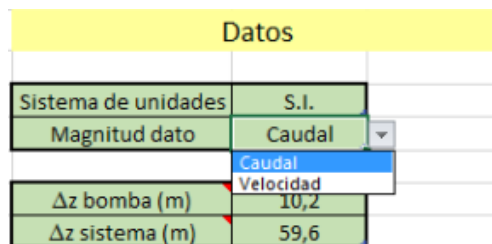


Fig. 32 Captura de la selección de caudal como magnitud dato.

2. En la hoja “Cálculos” hacer “click” en el botón “Ejecutar”, que tiene como consecuencia unos cambios en las celdas de la tabla contigua. Automáticamente obtendremos las curvas del sistema y sus ecuaciones correspondientes.

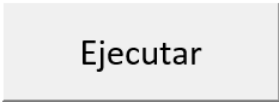


Fig. 8.2.3 Captura del botón Ejecutar que permite ejecutar la macro.

3. Comprobar que los coeficientes de la expresión matemática que modeliza la curva de “pérdidas incógnita” coincidan con los coeficientes usado para el cálculo de la columna de la tabla superior “Modelización sin OR”. En caso contrario introducirlos manualmente sustituyendo los valores anteriores.

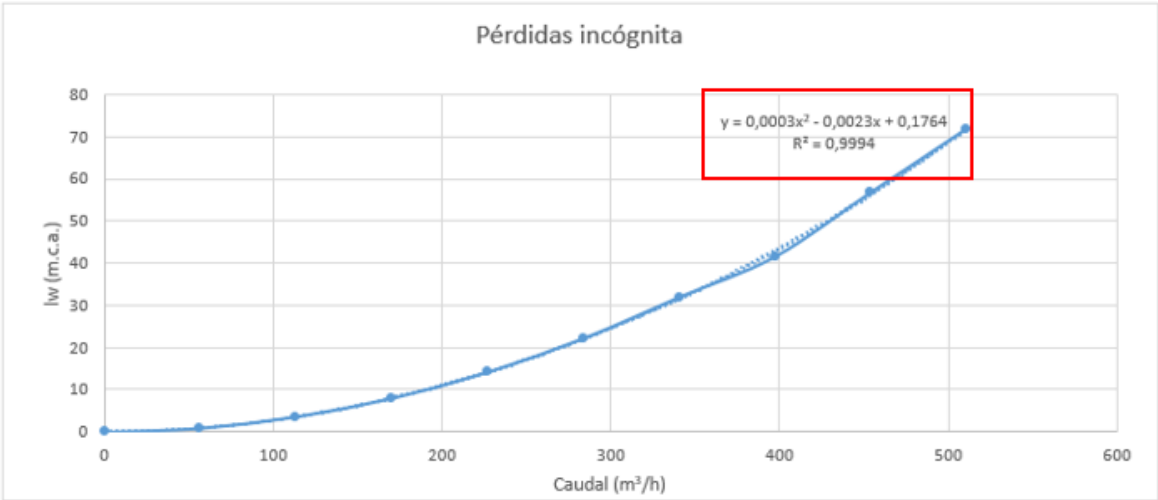
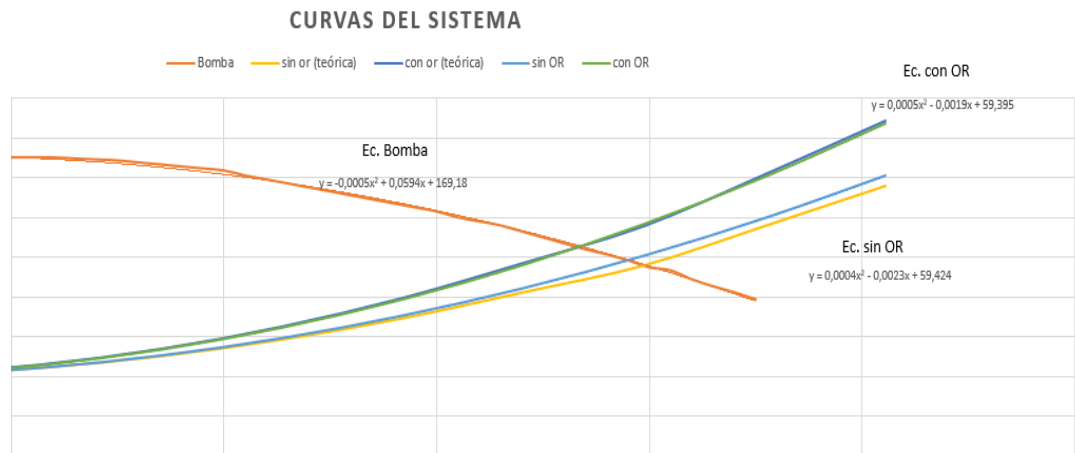


Fig. 33 Captura de la gráfica de pérdidas incógnita con la ecuación de la curva.

|                               |                |
|-------------------------------|----------------|
| =0,0003*D3^2-0,0023*D3+0,1764 |                |
| L                             | M              |
| Modelización sin OR           | Modelización c |
| 0,1764                        | -0,0282        |
| 1,01303392                    | 0,3169226      |
| 3,784129095                   | 1,3068657      |
| 8,489685525                   | 2,9416292      |
| 15,12970321                   | 5,2212132      |
| 23,70418215                   | 8,1456175      |
| 34,21312235                   | 11,714842      |
| 46,6565238                    | 15,928887      |
| 61,0343865                    | 20,787753      |
| 77,34671046                   | 26,291439      |

Fig. 8.2.5 Captura de la expresión introducida en la columna “Modelización sin OR”.

- Substituir los coeficientes de las ecuaciones llamadas “Ec. con OR” y “Ec. Sin OR” de la gráfica de curvas del sistema.



Los coeficientes A, B y C de cada curva se introducen en las casillas correspondientes, siguiendo la forma:

$$y = Ax^2 + Bx + C$$

|   | Bomba   | Sin OR  | Con OR  |
|---|---------|---------|---------|
| A | -0,0005 | 0,0004  | 0,0005  |
| B | 0,0594  | -0,0023 | -0,0019 |
| C | 169,18  | 59,424  | 59,395  |

Fig. 35 Captura de la tabla donde se deben introducir los coeficientes de las ecuaciones para el punto de funcionamiento.

- Para obtener las curvas de NPSH realizar el mismo procedimiento con la tabla que se encuentra al lado de la gráfica de NPSH.

|   | NPSHd      | NPSHr   |
|---|------------|---------|
| A | 3E-12      | 0,00002 |
| B | -0,0000009 | 0,0023  |
| C | 10,2       | 0,9364  |

Fig. 36 Captura de la tabla donde se deben introducir los coeficientes de las ecuaciones para el cálculo de la NPSH.

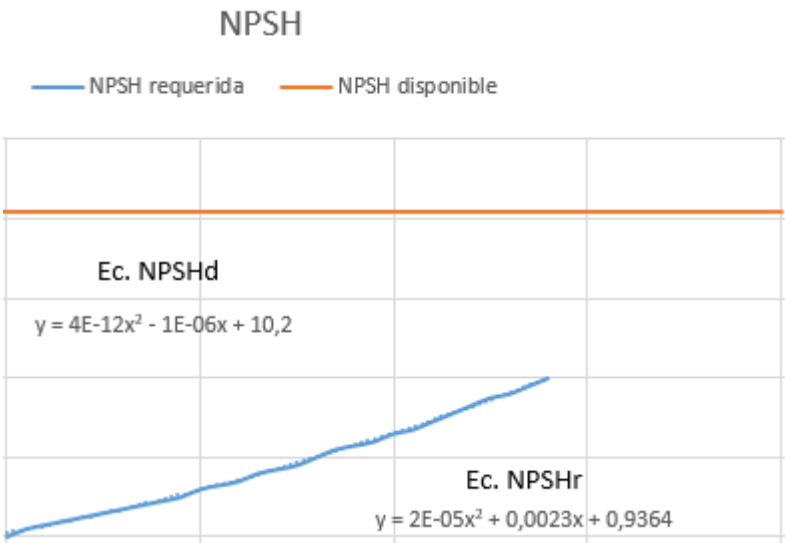


Fig. 8.2.9 Gráfica de las NPSH con las ecuaciones características de las curvas.

## 9. COSTE DEL PROYECTO DE INGENIERIA

A la hora de confeccionar el presupuesto de este proyecto únicamente se han tenido en cuenta las horas de trabajo realizadas por un ingeniero junior, así como el diferente material informático utilizado. Para hacer una estimación de los honorarios percibidos, se ha tenido en cuenta lo indicado en el anexo IV de la Orden ITC/958/2008 [11], que detalla las ayudas que el Estado entrega a las Pymes para el desarrollo de proyectos de innovación tecnológica, sabiendo que todo y no ser exactamente este caso, es válido para una estimación.

| Costes                           |       |             |          |
|----------------------------------|-------|-------------|----------|
|                                  | Horas | Precio(€/h) | Coste(€) |
| Material                         |       |             |          |
| Material informático             |       |             | 250      |
| Horas de trabajo                 |       |             |          |
| Estudio del caso y documentación | 80    | 31,25       | 2.500    |
| Desarrollo herramienta           | 150   | 31,25       | 4.687,5  |
| Redacción documento              | 100   | 31,25       | 3.125    |
| Total                            |       |             | 10.591,5 |

Tabla 9.1 Costes del proyecto.

El coste del material informático engloba tanto la depreciación del equipo informático, calculado a partir de la vida útil de este, como las licencias necesarias para el uso de los softwares y el coste de la conexión a la red para las tareas de documentación.



## Conclusiones

Este proyecto tenía unos objetivos claros, entre ellos el desarrollo de una herramienta capaz de agilizar los cálculos sobre modificaciones al responsable del sistema en cuestión. La herramienta diseñada permite la obtención de unos resultados con un error mínimo aceptable que son perfectamente utilizables a la hora de realizar cambios en el sistema de aspersión de la contención. El programa permite al usuario escoger entre diversas bombas la más adecuada teniendo en cuenta el caudal impulsado y las pérdidas superadas, prever que puede suceder en el sistema al cambiar el refrigerante o al aumentar la longitud de una tubería, al desgastarse las mismas y cambiar su coeficiente de fricción, etc.

Es cierto que esta herramienta no tiene la potencia de otros softwares existentes en el mercado, ya que tiene unas funciones limitadas. Su utilidad reside en la facilidad para realizar pequeñas modificaciones sin grandes esfuerzos de aprendizaje por parte del usuario. El hecho de estar desarrollado en un software como Microsoft Excel permite una mayor expansión del producto, ya que hoy en día se trata de un material que se encuentra disponible en la mayoría de ordenadores. Por tanto no hace falta gastarse grandes cantidades de dinero en licencias de softwares complejos si simplemente se quiere realizar un pequeño cambio, pero a la vez esta herramienta proporciona resultados fiables, por lo que finalmente da un buen resultado.

Se ha intentado realizar esta herramienta de la forma más versátil posible, para que dentro de las posibilidades que ofrece este programa se puedan realizar los mayores cambios posibles con facilidad, y obtener unos resultados fácilmente comprensibles y accesibles.

Trabajando más sobre este programa se podrían obtener avances interesantes, como por ejemplo, añadir sistemas relacionados para realizar estudios conjuntos, añadir más criterios de elección de las bombas como pueden ser el rendimiento o el consumo, poder seleccionar entre factores de fricción existentes en la central (los que se han utilizado en el proyecto) o proporcionados por tablas de manuales, etc.

Durante el desarrollo de este proyecto se han tenido en mente las futuras posibles utilidades de la herramienta por el responsable del sistema. Entre ellas el uso de la misma en el diseño de un sistema auxiliar de suministro de refrigerante al sistema de aspersión. Se trataría de un sistema móvil que permitiría seguir suministrando refrigerante a nuestro sistema en caso de que las otras vías de suministro (inyección desde depósito o recirculación) queden inutilizadas. Este sistema auxiliar es una de las grandes mejoras que se le podrían realizar a esta herramienta en un futuro.

Con todo, el trabajo realizado ha superado las expectativas iniciales, logrando los objetivos



marcados en un inicio, y consiguiendo un bueno resultado.

## Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer al director del proyecto Francesc Reventós todo el apoyo dedicación, disposición para ayudar a resolver todos los problemas que van surgiendo a lo largo de un proyecto como este, así como toda la información facilitada, que sin él hubiese sido imposible conseguir.

También me gustaría agradecer la ayuda del profesor del departamento de Mecánica de fluidos Esteve Jou por su ayuda a la hora de resolver los pequeños problemas que iban surgiendo a la hora del estudio previo y el desarrollo de la herramienta con relación a la mecánica de fluidos.

Así mismo fue de gran ayuda la charla con el profesor Antoni Brunet, clarificando todos los aspectos más complejos relacionados con el sistema de estudio de este proyecto.

Agradecer también al departamento de Ingeniería Nuclear de la ETSEIB, no solo a la hora de realizar el trabajo de fin de grado, sino también durante las asignaturas de Proyectos I y II del grado , ya que han despertado en mí el interés sobre el campo de la ingeniería nuclear. Es especial agradecer le al profesor Carlos Tapia, al que tuve el placer de tener de profesor en Proyectos I y II, por descubrirme esta rama de la ingeniería que tan poca presencia tiene en el grado.

Para acabar agradecer a mi familia y amigos el apoyo incondicional, que junto con su ayuda y consejos en los momentos más difíciles me han permitido llevar a buen puerto este proyecto.



# Bibliografía

## Referencias bibliográficas

- [1] DEPARTAMENT D'ENGINYERIA NUCLEAR, *Transparencies de la assignatura Fonaments d'enginyeria nuclear*, Cuatrimestre de primavera 2016. ETSEIB. Barcelona.
- [2] NUCLEAR POWER. *Containment Building*. [<http://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/containment-building/>, 3 de Agosto de 2016]\*.
- \*[URL, fecha de consulta].
- [3] AGENCIA DE SEGURIDAD NUCLEAR. *Accidentes nucleares*. [<https://sites.google.com/site/energianuclear3c/accidentes-nucleares>, 28 de julio de 2016] .
- [4] UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. *Description of the safety issues*. 9 de mayo de 2013. [<http://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/pwr-sump-performance/safety-concern.html>, 10 de julio de 2016].
- [5] TECNATOM S.A. *Manual Rociado de la contención – BK –*. Pag. 13 Descripción general.
- [6] UNIVERSIDAD DE GRANADA. *Diseño del sistema de tuberías y cálculo de las bombas*. Granada.  
[<http://www.ugr.es/~aulavirtualpfciq/descargas/documentos/BOMBAS%20Y%20TUBERIAS.pdf>, 28 de junio de 2016].
- [7] FUNDAMENTALS PUMPS, *Centrifugal pump system tutorial*. [<http://www.pumpfundamentals.com/tutorial3.htm>, 21 de julio de 2016].
- [8] DEPARTAMENT DE MECÀNICA DE FLUIDS, *Transparencies de la assignatura Mecànica de fluids*, Cuatrimestre de primavera 2015. ETSEIB. Barcelona.
- [9] L.F.MOODY, *Trans. ASME*, vol. 66, 1944.
- [10] TECNOINDUSTRIA. *La temperatura del fluido y el comportamiento de las bombas*. [<https://technoindustria.wordpress.com/2015/03/08/la-temperatura-del-fluido-y-el-comportamiento-de-las-bombas/>, 21 de julio de 2016].
- [11] BOE núm. 85, 08-04-2008 (DIA), Ministerio de Industria Turismo y Comercio



## Bibliografía complementaria

- CRANE. *Flujo de fluidos en válvulas accesorios y tuberías*. McGraw-Hill. Madrid.
- BOSSER, J. *Vademécum de mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas*, Barcelona: ETSEIB - CPDA . 1985.
- DEPARTAMENT D'ENGINYERIA NUCLEAR, *Transparencies de la assignatura Fonaments d'enginyeria nuclear*, Cuatrimestre de primavera 2016. ETSEIB. Barcelona.
- DEPARTAMENT DE MECÀNICA DE FLUIDS, *Transparencies de la assignatura Mecànica de fluids*, Cuatrimestre de primavera 2015. ETSEIB. Barcelona.
- TECNATOM S.A. *Manual Rociado de la contención – BK –*. Pag. 13 Descripción general.
- UNIVERSIDAD DE GRANADA. *Diseño del sistema de tuberías y cálculo de las bombas*. Granada.  
[<http://www.ugr.es/~aulavirtualpfcicq/descargas/documentos/BOMBAS%20Y%20TUBERIAS.pdf>, 28 de junio de 2016].



Trabajo de Fin de Grado

## Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

### Desarrollo de una herramienta para el diseño de un sistema de aspersión de la contención

**Anexo A: Ilustración central PWR**

**Anexo B: Tabla completa de cálculos de la herramienta**

**Anexo C: Gráfica de resultados ampliada**

**Autor:** Antonio Bosch Durán  
**Director:** Francesc-Josep Reventós Puigjaner  
**Convocatoria:** Septiembre 2016



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona







Anexo A: Ilustración central PWR

- Pressurized Water Reactor**
1. Reactor building
  2. Cooling tower
  3. Reactor vessel
  4. Control rod
  5. Pressurizer
  6. Steam generator
  7. Fuel element
  8. Turbine
  9. Generator
  10. Transformer
  11. Condenser
  12. Gaseous
  13. Liquid
  14. Air
  15. Air (humid)
  16. River
  17. Cooling-water circulation
  18. Primary circuit
  19. Secondary circuit
  20. Water vapor
  21. Pump

Nuclear Power Plants - PWR

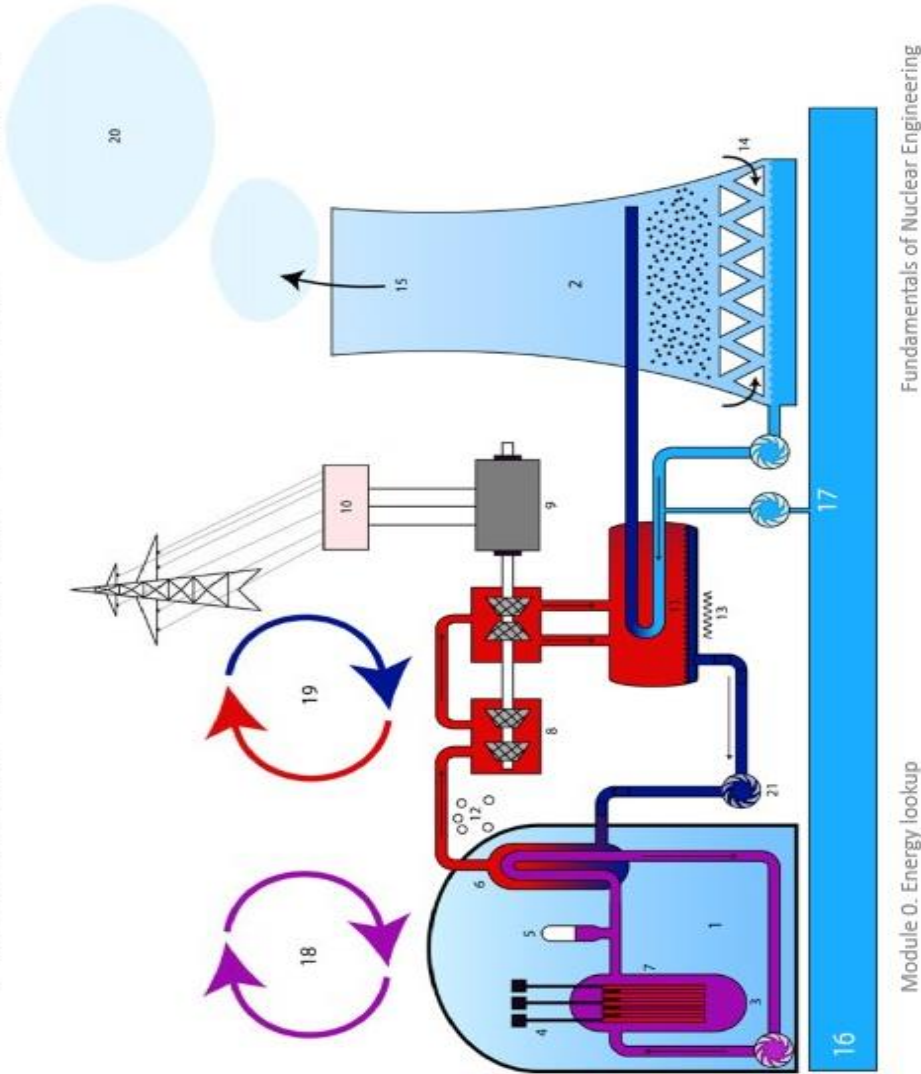


Figura1 Esquema central nuclear.

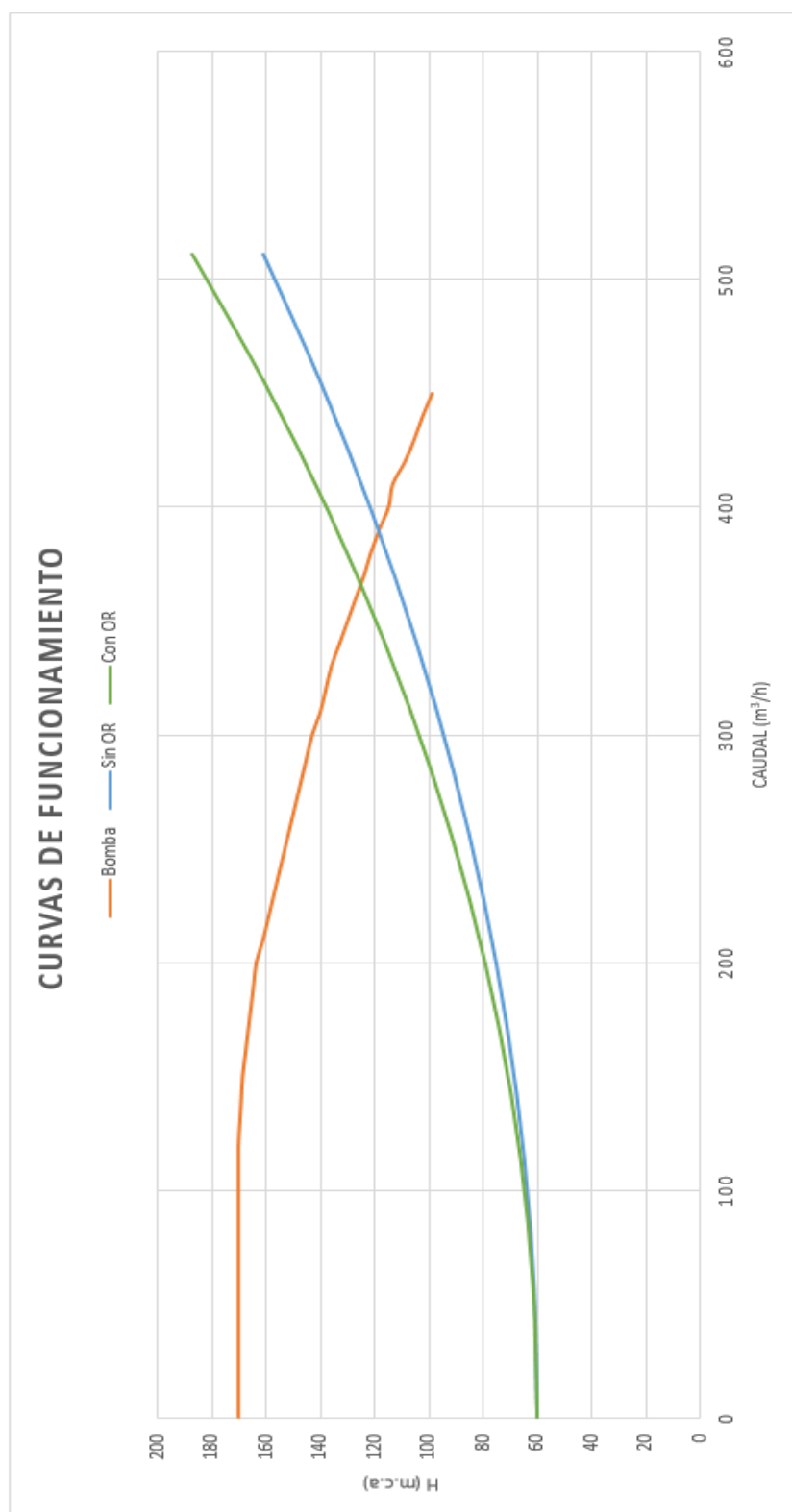


Anexo B: Tabla completa de cálculos de la herramienta

| Caudal (gpm) | Caudal (m³/h) | lv teoricas sin OR | lv resultado sin OR | diferencia sin OR | lv teoricas con OR | OR   | TDH <sub>s</sub> sin or | TDH <sub>s</sub> con or | Modelización sin OF | Modelización con OR | Total sin OR | Total con OR | Error sin OR | Error con OR |
|--------------|---------------|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------|------|-------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 0            | 0             | 0                  | 0                   | 0                 | 0                  | 0    | 59,6                    | 59,6                    | 0,1764              | -0,0282             | 59,7764      | 59,7482      | 0,29597354   | 0,24885772   |
| 250          | 56,7817727    | 1,2                | 0,30132014          | 0,89867986        | 1,6                | 0,4  | 60,8                    | 61,2                    | 1,01303382          | 0,31632268          | 60,91416593  | 61,22108861  | 0,187772518  | 0,05073839   |
| 500          | 113,5623545   | 4,8                | 1,204528057         | 3,595471943       | 6,4                | 1,6  | 64,4                    | 66                      | 3,784123096         | 1,306865779         | 64,58685715  | 65,89552293  | 0,292345687  | -0,16829659  |
| 750          | 170,3435318   | 10,7               | 2,710188128         | 7,989811872       | 14,3               | 3,6  | 70,3                    | 73,9                    | 8,498685625         | 2,941623295         | 70,79987365  | 73,74150295  | 0,71057827   | -0,21447504  |
| 1000         | 227,1247091   | 19                 | 4,81812227          | 14,1818777        | 25,5               | 6,5  | 78,6                    | 85,1                    | 15,12970321         | 5,22123231          | 79,54781544  | 84,76302867  | 1,206372057  | -0,38832049  |
| 1250         | 283,9058863   | 29,7               | 7,528300354         | 22,17163965       | 39,9               | 10,2 | 88,3                    | 98,5                    | 23,70418215         | 8,14617584          | 90,8324825   | 98,97810009  | 1,716106828  | -0,52452252  |
| 1500         | 340,68710636  | 42,8               | 10,84075251         | 31,95924749       | 57,5               | 14,7 | 102,4                   | 117,1                   | 34,2132235          | 11,7484236          | 104,6538749  | 116,3887172  | 2,201049664  | -0,62449427  |
| 1750         | 397,4682409   | 56,3               | 14,76546869         | 41,54453131       | 76,1               | 19,8 | 116,9                   | 135,7                   | 46,6565238          | 15,92888755         | 121,019325   | 136,94088    | 4,110632389  | 0,91442881   |
| 2000         | 454,2434181   | 76,1               | 19,27244691         | 56,82755109       | 102,1              | 26   | 136,7                   | 161,7                   | 61,0343865          | 20,78775315         | 139,9063354  | 160,6345886  | 3,10039785   | -0,52177578  |
| 2250         | 510,005954    | 96,3               | 24,39169315         | 71,90830685       | 129,1              | 32,8 | 155,9                   | 188,7                   | 77,34671046         | 26,29143918         | 161,3840036  | 187,6299428  | 3,498392209  | -0,85712094  |

Figura2 Tabla de la hoja "Cálculos".



**Anexo C: Gráfica de resultados ampliada***Figura3 Gráfica curvas del sistema y de la bomba.*

